

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Electrotechnique

Option Machines Electrique

présenté par

Yazza Zakaria

&

Kacimi Riadh

Amélioration du transit de puissance d'un réseau électrique par l'utilisation de dispositifs FACTs (STATCOM)

Proposé par : Dr. Belazzoug.M

Année Universitaire 2019-2020

Remerciement

Mes remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toute cette année. Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Dr. Belazzoug pour avoir d'abord proposé ce thème, pour suivi continuel tout ce long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et remarques.

Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de Coin à accomplir ce travail.

ملخص

إن تحسين نوعية الطاقة التي تقدمها الشبكة الكهربائية تكتسي اليوم جانبا مثيرا للاهتمام , و منذ تطور إلكترونيات الطاقة ظهرت الأنظمة المرنة لنقل التيار المتردد (FACTS) التي لعبت دورا هاما في تحسين نوعية الطاقة. هذه الأنظمة يمكن أن توضع على التفرع (STATCOM)، على التسلسل (TCSC) أو تفرع-تسلسل (UPFC). أجريت هذه الأبحاث على كفاءة هذه الفئات FACTS على الشبكة الكهربائية في الأنظمة الثابتة والديناميكية في تحسين نوعية الجهد الكهربائي. النقاط التي استخلصت من هذه الدراسة، أجهزة FACTS الموصولة على التفرع (STATCOM) من حيث السيطرة على الجهد في مواضع تركيبها وكذلك تحسين سريان الطاقة.

Résumé

La nécessité d'améliorer la qualité de l'énergie électrique fournie par le réseau électrique revêt aujourd'hui un aspect très intéressant. Le développement d'électronique de puissance a fait surgir les dispositifs FACTS qui peuvent jouer un rôle très important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie. Ces dispositifs peuvent être placés en shunt (STATCOM), en séries (TCSC) ou en série-shunt (UPFC).

Une étude a été menée sur l'effet de ses types de FACTS sur le réseau en régime statique et dynamique de point de vue régulation de la tension.

Les points mis à exergue sont l'efficacité de STATCOM, en terme de contrôle la tension au nœud auquel ils sont connectés, ainsi que l'amélioration de l'énergie.

Abstract

The need to improve the quality of power supplied by the network is now a very interesting aspect. The development of power electronics has brought out the FACTS devices that can play a very important role in improving the quality of energy. These devices can be placed in shunt (STATCOM), in series (TCSC) or in series-shunt (UPFC).

A study was carried out on the effect of its types of FACTS on the network in static and dynamic conditions from the point of view of voltage regulation.

The points that were drawn are the efficiency of STATCOM, in terms of controlling the voltage at the node to which they are connected, as well as the improvement of the energy.

Sommaire

SOMMAIRE

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Liste des symboles

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1	3
1.1 INTRODUCTION	4
1.2 LES RESEAUX ELECTRIQUES	4
1.2.1 <i>Le transport et la répartition</i>	5
1.2.2 <i>Distribution</i>	6
1.3 LES PROBLEMES DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES	6
1.3.1 <i>Variations de fréquence</i>	6
1.3.2 <i>Creux de tension et coupures brève</i>	7
1.3.3 <i>Chute de tension</i>	7
1.3.4 <i>Déséquilibre de tension</i>	9
1.3.5 <i>Puissance réactive</i>	10
1.3.6 <i>Surtensions:</i>	10
1.4 CONCLUSION	12
CHAPITRE 2	13
2.1 INTRODUCTION	14
2.2 DISPOSITIF FACTS	14
2.2.1 <i>Définition et le rôle d'un dispositif FACTS</i>	14
2.2.2 <i>Nécessité des dispositifs FACTS</i>	16
2.2.3 <i>Classification des dispositifs FACTs:</i>	17
2.2.4 <i>Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :</i>	18
2.2.5 <i>Fonctionnement des FACTS :</i>	19
• <i>Réseau de transport</i>	20
• <i>Réseaux Industriels</i>	20
2.2.6 <i>Historique des dispositifs FACTS</i>	20
2.2.7 <i>Coût des dispositifs FACTs</i>	21
2.2.8 <i>Les avantages, les inconvénients et les contraintes de la technologie des dispositifs FACTS</i>	22
2.3 STRUCTURE DES PRINCIPAUX DISPOSITIFS FACTS	23
2.3.1 <i>Les dispositifs Série :</i>	24
a. <i>Compensateurs Série à basse thyristor :</i>	24
2.3.2 <i>Les dispositifs parallèles (shunt) :</i>	25
a. <i>Compensateurs parallèles à basse thyristor :</i>	25

b. Compensateurs parallèles à basse GTO (convertisseur de tension) :	26
2.4 MODELISATION DU STATCOM	32
2.4.1 <i>Modèle mathématique simplifié</i>	33
2.4.2 <i>Contrôle du STATCOM</i>	36
2.4.3 <i>Détermination des références</i>	36
2.4.4 <i>La Méthode Watt Var découplée</i>	37
2.4.5 <i>Régulateur PI avec compensation de pôles</i>	40
2.4.6 <i>Régulation de la tension continue U_{dc}</i>	41
2.4.7 <i>Commande de l'Onduleur</i>	42
3.5 CONCLUSION	43
CHAPITRE 3	44
3.1 INTRODUCTION	45
3.2 LE POWER SYSTEM ANALYSIS TOOLBOX (PSAT)	45
3.2.1 <i>PSAT ?</i>	45
3.2.2 <i>Manipulation avec PSAT</i>	46
3.3 RESEAU TEST DE 14 JEUX DE BARRE ETAT NORMAL	46
3.3.1 <i>Présentation du réseau</i>	46
3.3.2 <i>Calcul de l'écoulement de la puissance</i>	47
3.4 RESEAU TEST DE 14 JEUX DE BARRE AVEC UN DEFAUT AU NŒUD 11	48
3.5 LA CONNEXION D'UN DISPOSITIF FACTS (STATCOM) AUX RESEAU	50
3.5.1 <i>La connexion d'un dispositif FACTS (STATCOM) aux bus 4</i>	50
3.5.2 <i>La connexion d'un dispositif FACTS (STATCOM) aux bus 4 et bus 10</i>	51
3.5.3 <i>La connexion d'un STATCOM aux bus 4 et bus 10 et 6 :</i>	52
3.6 COMPARAISON ENTRE LA TENSION DES NŒUDS AVANT ET APRES LA COMPENSATION	54
3.6.1 <i>Les commentaires</i>	55
3.7 CONCLUSION	55
CONCLUSION GENERALE	56

Références Bibliographiques

Liste des figures

Figure 1.1. Structure de base d'un réseau d'énergie électrique.	5
Figure 1.2. Variation de fréquence	6
Figure 1.3. Creux de tension et coupure brève	7
Figure 1.4. Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale	8
Figure 1.5. Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale	8
Figure 1.6. Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales	9
Figure 1.7. Déséquilibre de tension	10
Figure 1.8. Les surtensions transitoires	12
Figure 1.9. Exemple de surtension	12
Figure 2.1. Ligne de transport de courant alternatif	16
Figure 2.2. Puissance transitée entre deux réseaux	21
Figure 2.3. Schéma équivalent d'un UPFC	23
Figure 2.4. Structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent	24
Figure 2.5. Schéma du SVC	26
Figure 2.6. STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent	26
Figure 2.7. STATCOM (Static Synchronous Compensator).	28
Figure 2.8. Schéma équivalent de STATCOM connecté à réseau électrique	28
Figure 2.9.a Courbes simulées du courant et tensions en mode capacitif	30
Figure 2.9.b Courbes simulées du courant et tensions en mode inductif	30
Figure 2.10. P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}	31
Figure 2.11. Diagrammes de phase des différents modes de fonctionnement du STATCOM	32
Figure 2.12. Structure base d'un STATCOM couplé au réseau	33
Figure 2.13. Schéma équivalent de STATCOM	34

Figure 2.14. Passage de repère (α,β) vers le repère (d,q)	35
Figure 2.15. Identification des courants de référence	37
Figure 2.16. Le transfert I en fonction de X1	38
Figure 2.17. Le transfert I en fonction de X2	38
Figure 2.18. Régulation de découplage de Ishd	39
Figure 2.19. Schéma de régulation de STATCOM (watt-Var découplée).	39
Figure 2.20. Schéma bloc de la régulation de PI des courants du STATCOM	40
Figure 2.21. Régulation de la tension continue	41
Figure 2.22. Principe de l'MLI Sinus-Triangle	42
Figure 2.23. Principe de la commande par hystérésis	43
Figure 3.1. Page d'accueil du PSAT	45
Figure 3.2. Topologie du réseau étudié.	46
Figure 3.3. Les tensions de chaque jeu de barre	47
Figure 3.4. Les tensions de chaque jeu de barre en fonction de temps	48
Figure 3.5. Topologie du réseau avec défaut.	48
Figure 3.6 Les tensions de chaque jeu de barre après création d'un défaut.	49
Figure 3.7. Les tensions de chaque JDB après création d'un défaut en fonction de temps.	50
Figure 3.8. Topologie du réseau avec la connexion de STATCOM au bus 4	50
Figure 3.9. Les tensions de chaque JDB après la compensation (STATCOM en bus 4)	51
Figure 3.10. Topologie du réseau avec la connexion de STATCOM au bus 4 et bus 10	51
Figure 3.11. Les tensions de chaque jeu de barre après ajoute le STATCOM au bus 4 et 10	52
Figure 3.12. Topologie du réseau avec la connexion de STATCOM au bus 4 et 10 et bus 6	52
Figure 3.13. Les tensions de chaque jeu de barre après la compensation	53
Figure 3.14. Les tensions de chaque JDB après la compensation en fonction de temps	54

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Principaux dispositifs des FACTS	18
Tableau 2.2. Bénéfices techniques des dispositifs FACTS	19
Tableau 2.3. Le rôle des différents dispositifs FACTS	20
Tableau 2.4. Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS	22
Tableau 3.1. Niveaux de tensions, puissances injectées et consommées	47
Tableau 3 .2. Niveaux de tensions, puissances injectées et consommées (défaut bus 11)	49
Tableau 3.3. Niveaux de tensions, puissances injectées et consommées avec le STATCOM	53

Liste des abreviations

FACTS: Flexible Alternating Current Transmission Systems.

GTO: Gate Turn Off.

HT: Haute Tension.

IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistors.

IPFC: Interline Power Flow Controller.

MT: Moyenne Tension.

PI: Proportionnel Intégral (régulateur).

STATCOM: Static Synchronous Compensator.

SSSC: Static Synchronous Series Compensator.

SVC: Static Var Compensator.

TCPAR: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.

TCR: Thyristor Controlled Reactor.

TSC: Thyristor Switched Capacitor.

TCSR: Thyristor Controlled Series Reactor.

THT: Très Haute Tension.

TCSC: Thyristor Controlled Series Capacitor.

UPFC: Unified Power Flow Controller.

MLI: Modulation par Largeur d'Impulsion.

SPTE: Système de production et transport électrique

Liste des symboles

d (indice) La composante sur l'axe d du repère (d-q).

q (indice) : La composante sur l'axe q du repère (d-q).

p.u (indice) : La grandeur en unité relative (grandeur réduite).

XL : Réactance inductive.

Xc : Réactance capacitive.

α : L'angle d'allumage.

σ : L'angle de conduction.

Vr : Tension au jeu de barre de réception.

Ish : Courant (shunt) injecté par le STATCOM.

Vsh : Tension (shunt) injectée par le STATCOM.

Psh : Puissance active délivrée par le STATCOM.

Psh_ref : Puissance active de référence délivrée par le STATCOM.

Qsh : Puissance réactive délivrée par le STATCOM.

Psh_ref : Puissance réactive de référence délivrée par le STATCOM.

θ : Déphasage du courant de la ligne.

Lsh : L'inductance du transformateur de couplage.

Rsh : Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.

Ish_d : La composante directe du courant fournit par le STATCOM.

Ishd_ref : La composante directe de référence du courant fournit par le STATCOM.

Ish_q : La composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.

Ishq_ref : La composante quadrature de référence du courant fournit par le STATCOM.

Vsh_d : La composante directe de la tension générée par le STATCOM.

Vsh_q : La composante quadrature de la tension générée par le STATCOM.

IDC : Courant dans le circuit continu.

UDC : Tension continu aux bornes du condensateur.

Kp : Constante proportionnel.

Ki : Constante intégrale.

Introduction Générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs pour lesquels la consommation de l'énergie électrique augmente régulièrement. Ainsi, pour avoir un équilibre entre la production et la consommation, il est nécessaire d'augmenter le nombre de centrales électriques, de lignes, de transformateurs etc..., ce qui implique une augmentation de coût et une dégradation du milieu naturel.

Le maintien de l'équilibre entre la production et la consommation nécessite alors une surveillance permanente du système afin d'assurer la qualité du service (problème de conduite), garantir sa sécurité (problème de protection) et sa stabilité (problème de réglage). D'autre part plus que le réseau augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler.

Ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que : le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre les différentes parties du réseau...etc.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont exploités mécaniquement : malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long.

Le développement rapide de l'électronique de puissance a un effet considérable dans l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques en performant le contrôle de leurs paramètres par l'introduction de dispositifs de contrôle à base des composants d'électronique de puissance très avancés (GTO-Gate Turn Off-, IGBT -Insulated Gate Bipolar Transistors) connus sous l'acronyme FACTS: Flexible Alternatif Current Transmission Systems.

La nouvelle génération des systèmes FACTS est constituée principalement par des convertisseurs de tension (ou courant), à base des interrupteurs statiques modernes (GTO ou IGBT) commandées en ouverture et en fermeture, liés à des condensateurs comme source de

tension continue. Ces convertisseurs selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt, série et hybride tels que : STATCOM, SSSC, UPFC respectivement.

L'objectif de ce modeste travail est d'étudier les fonctions de contrôle offerts par le STATCOM dans la compensation de la puissance réactive aussi que le maintien de la tension au point de raccordement. Cette étude qui est organisée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre a donné une brève revue sur l'opération de transport de l'énergie électrique ainsi que les problèmes liés à la tension, la puissance active et réactive.
- Le deuxième chapitre est consacré à la description de la structure de dispositifs FACTS, une explication en détail des principes de leurs fonctionnements et rôles.
- La modélisation du réseau électrique et de dispositif FACTS (SVC, TCSC et UPFC) a fait l'objectif du troisième chapitre. La stratégie de commande Watt-Var découplé adoptée pour le contrôle des courants actifs et réactifs de ce dispositif est expliqué ainsi que le calcul de tous les régulateurs proportionnels intégraux.
- Afin de valider la théorie et les modèles exposés dans les chapitres précédents une simulation structurée est exécutée dans l'environnement Matlab-Simulink de ce contrôleur intégré dans un réseau simple de transport de l'énergie électrique. Les courbes de la majorité des paramètres du réseau dans plusieurs cas de simulation sont présentées et interprétées dans ce quatrième chapitre.

Enfin, on présentera une conclusion générale et proposera des perspectives d'études futures permettant de compléter ce travail.

Chapitre 1

**Transport de l'énergie électrique et leur problèmes liés à la tension,
la fréquence**

1.1 Introduction

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont la puissance réactive et le niveau de tension. La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernant l'exploitation des réseaux électriques

1.2 Les réseaux électriques

L'énergie électrique est transportée et distribuée par des lignes aériennes et des câbles souterrains ou sous-marins du point de sa production vers celui de son utilisation, constituant ce qui est appelé un réseau électrique. Ces réseaux fonctionnent en courant alternatif à la fréquence de 50Hz, et permettent à l'aide de transformateurs de choisir le niveau de tension le plus adapté techniquement et économiquement, à la production, au transport, à la distribution et à la consommation de l'énergie électrique. En outre, la maîtrise des court-circuits et la coupure des courants en cas de défaut sont nettement plus aisées à réaliser en courant alternatif qu'en courant continu. Les réseaux électriques modernes en courant alternatif sont organisés en deux types, d'une part, les réseaux de transport et de répartition à tension élevée (>30kV jusqu'à 400kV) et à structure maillée, d'autre part, les réseaux de distribution à tension typiquement inférieure à 30kV et à structure radiale [1].

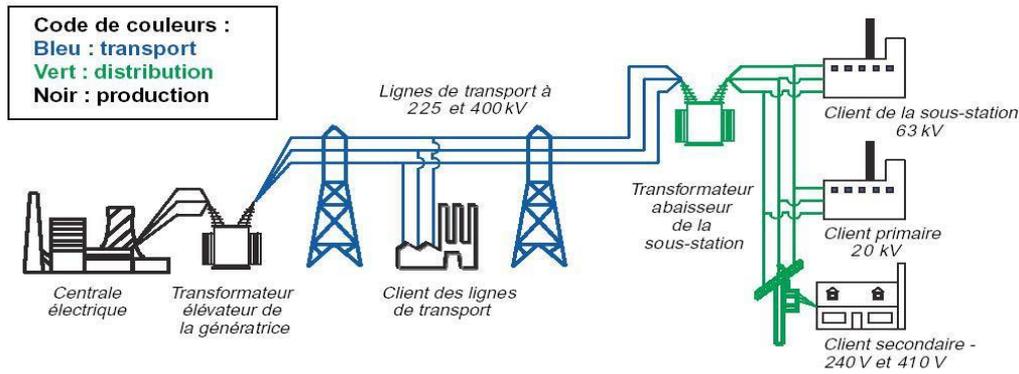


Figure 1.1. Structure de base d'un réseau d'énergie électrique.

1.2.1 Le transport et la répartition

Le rôle du réseau de transport est d'acheminer l'énergie électrique à partir des centrales situées à différents endroits du territoire jusqu'au réseau de distribution qui en dernier lieu alimente les charges. Les lignes de transport assurent aussi l'interconnexion des réseaux régionaux, ce qui permet, non seulement d'assurer une répartition économique de l'énergie électrique dans les régions elles-mêmes dans les conditions normales d'exploitation, mais aussi, un transfert interrégional de l'énergie, dans les situations d'urgence.

Les niveaux de tension utilisés pour le transport diffèrent d'un pays à un autre mais une tendance à une normalisation existe. Font partie du réseau de transport toutes les lignes dont le niveau de tension est supérieur à 60 kV. En Algérie, les tensions usitées pour le transport sont de 90 kV, 150 kV, 220 kV et 400 kV. Aux Etats-Unis, les tensions sont normalisées à 69 kV, 115 kV, 138 kV, 161 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV, et 756 kV. [2]

Les lignes de transport dont la tension est supérieure à 500 kV sont dites à ultra haute tension, celles dont la tension est supérieure à 150 kV, mais inférieure à 500 kV, sont dites à très haute tension (THT). Ces seuils varient d'un pays à un autre. Les lignes de transport aboutissent toutes à des sources dites de répartition. Ces dernières permettent d'assurer la commutation des lignes d'une part, et d'abaisser la tension à des niveaux permettant la répartition de l'énergie électrique d'autre part. Il est à noter que de très grands centres de consommation industriels sont directement alimentés à partir du réseau de transport. [2]

1.2.2 Distribution

Le réseau de distribution est la partie de réseau reliant les postes sources de distribution aux postes de consommateurs. Les lignes du réseau primaire de distribution sont d'un niveau de tension compris entre 5.5 kV et 36 kV et alimentent les charges d'une zone géographique bien précise. Certaines petites unités industrielles sont directement alimentées par le réseau primaire moyen tension (MT). Le réseau secondaire de distribution est généralement à basse tension pour un usage commercial et résidentiel.

En Algérie, la basse tension est de 380/220V triphasé-4 conducteurs. Dans certains pays, elle est encore en triphasé 220/127 V- 4 conducteurs. Le réseau de distribution est à la fois, aérien et souterrain. Ce dernier a connu ces dernières décennies un accroissement rapide qui fait qu'il représente aujourd'hui la majeure partie du réseau de distribution. [2]

1.3 Les problèmes dans les réseaux électriques

Il existe certaines limitations à la quantité d'énergie transmise par une ligne de transport. Les limites de transmission sont imposées par réseau ou par les contraintes physiques et sont donc sujettes à un certain nombre de facteurs pour le fonctionnement d'un système électrique.

1.3.1 Variations de fréquence

Les variations de fréquence sont très faibles (moins de 1 %) au sein du réseau synchrone européen en régime normal de fonctionnement et ne causent généralement pas de préjudice aux équipements électriques ou électroniques.

La situation peut être différente dans un petit réseau isolé. Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu [3].

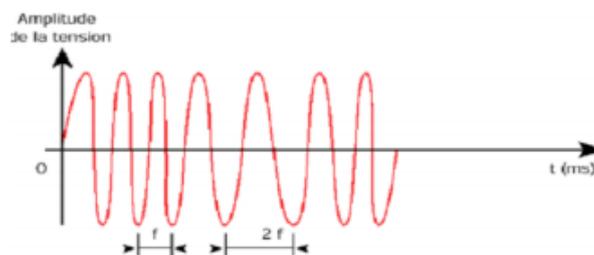


Figure 1.2. Variation de fréquence

1.3.2 Creux de tension et coupures brève

Les creux de tension et les coupures brèves sont principalement causés par des phénomènes conduisant à des courants élevés qui provoquent à travers les impédances des éléments du réseau une chute de tension d'amplitude d'autant plus faible que le point d'observation est électriquement éloigné de la source de la perturbation.

Les creux de tension et les coupures brèves ont différentes causes :

- des défauts sur le réseau de transport (HT) de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même [4].

Les creux de tension et les coupures brèves sont causés par des phénomènes aléatoires.

Ces phénomènes concernent soit le réseau du distributeur, soit le réseau de l'utilisateur [4].

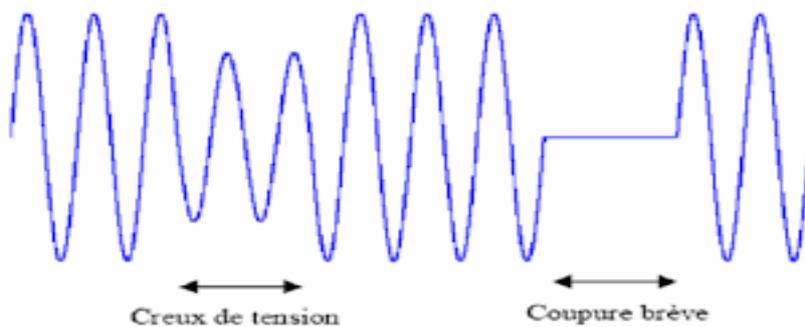


Figure 1.3. Creux de tension et coupure brève

1.3.3 Chute de tension

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension figures (1-4) et (1-5) La tension est alors plus basse au bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

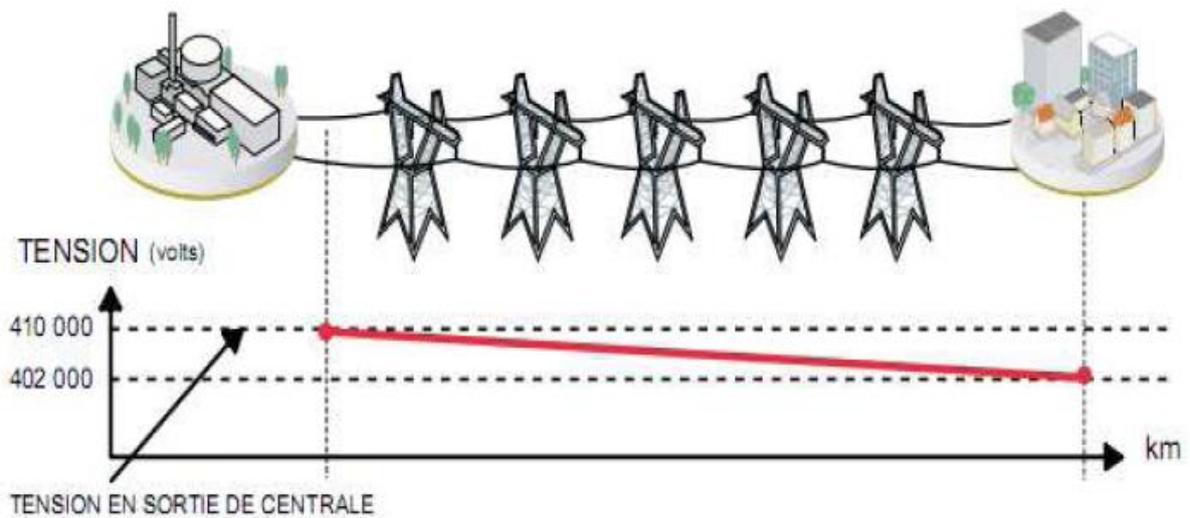


Figure 1.4. Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

Si la consommation double, la chute de tension double

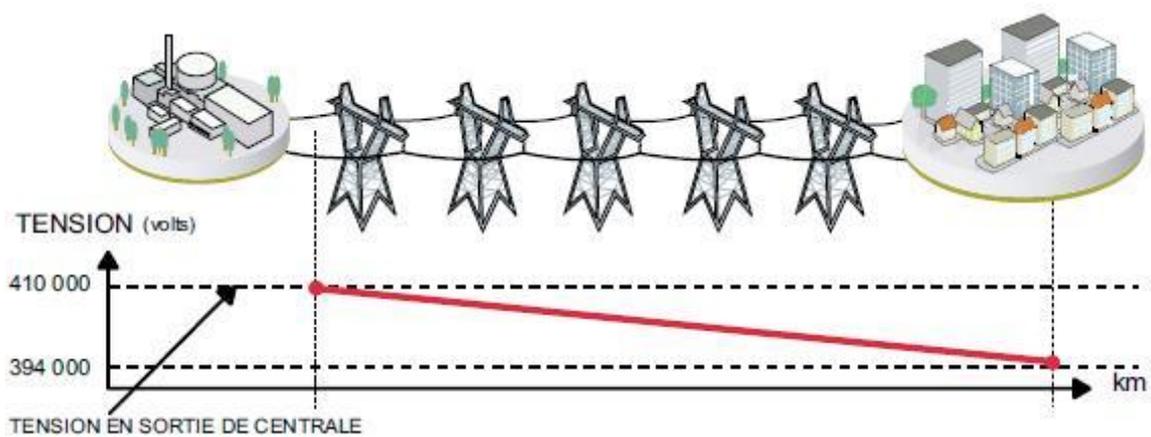


Figure 1.5. Cas d'une forte consommation alimentée par une ligne depuis une centrale

- Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

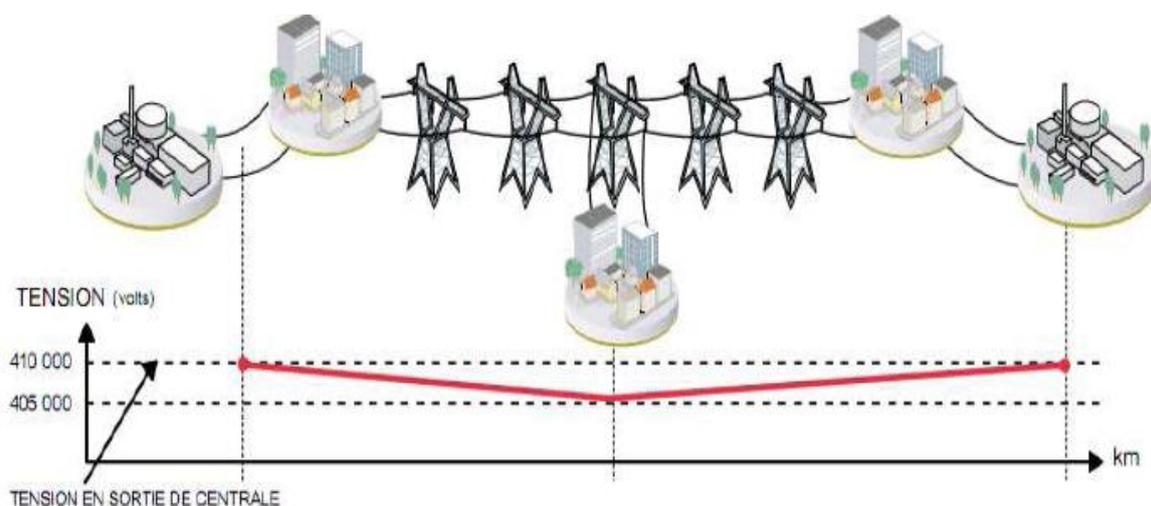


Figure 1.6. Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés de centrales.

Figure (1-4) (1-5) (1-6) sont valables pour un instant donné, à un niveau de consommation donné.

Lorsque la consommation varie au cours du temps, la tension évolue, baissant lorsque la consommation augmente, remontant lorsque la consommation diminue. Le fait que la tension ne soit pas identique en tout point du réseau est normal. Cette différence est compensée par des réglages de tension réalisés dans les postes de transformation. Cela permet de garantir que la tension reste dans la plage admissible en tout point de livraison

1.3.4 Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation des courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire.

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° [5][1].

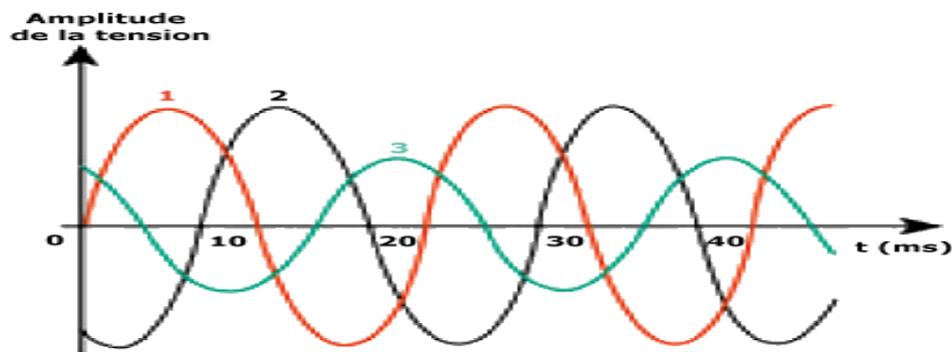


Figure 1.7. Déséquilibre de tension

1.3.5 Puissance réactive

Le transport de la puissance réactive à longue distance présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes de ligne par effet joule et moins de capacité pour transporter la puissance active.

A l'exception de ces aspects purement statiques, la puissance réactive peut jouer un grand rôle dans d'autres aspects dynamiques, tels-que les fluctuations de tension produites par les variations soudaines des charges et une meilleure marge pour la stabilité.

Actuellement, avec la complexité des réseaux, la participation des générateurs dans la production de l'énergie réactive est devenue insuffisante. Elle est générée en grande partie par les moyens de compensation existants ou en période creuse, par les lignes de transport.

Afin de garantir une bonne qualité d'énergie il est nécessaire de satisfaire l'équilibre offre demande de l'énergie réactive, de fournir une tension aussi régulière que possible et de respecter un certain nombre de contraintes techniques. [1]

1.3.6 Surtensions:

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension. Les surtensions sont de trois natures;

- Temporaires à fréquences industriels
- De manœuvre
- D'origine atmosphérique (foudre)

Elles peuvent apparaître

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre)
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre). [6]

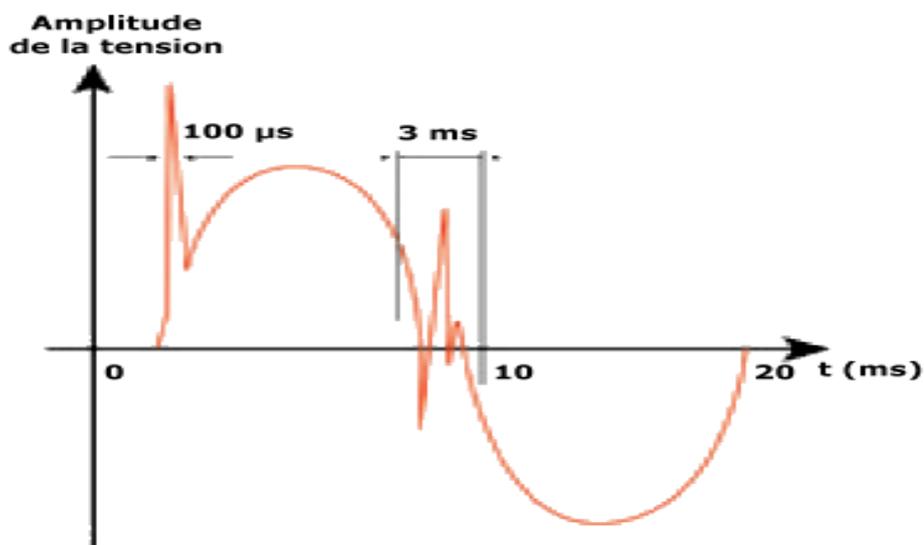


Figure 1.8. Les surtensions transitoires.

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1.1Pu à 1.8 pu Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1.73 pu c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1.5pu. [6]

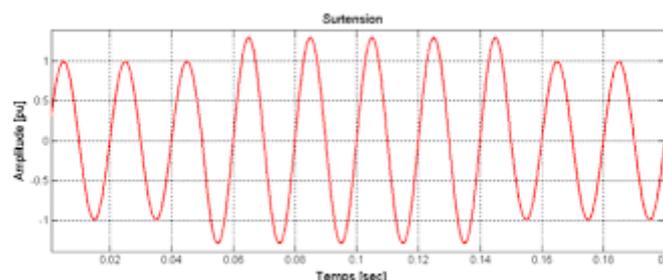


Figure 1.9. Exemple de surtension.

Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par Ferro résonance ou par des manœuvres sur le réseau. Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires [6].

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état de l'art sur le fonctionnement des réseaux d'énergie électrique, on commence par les types de réseaux, les problèmes dans les réseaux électriques qui limitent la puissance transmissible dans les lignes de transport.

Actuellement il existe une méthode moderne et sophistiquée pour le contrôle de tension et pour optimiser la puissance réactive dans les réseaux électriques. Cette méthode utilise les dispositifs FACTS (basées sur l'électronique de puissance) qu'ils seront traités en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre 2

Dispositifs FACTS, leurs fonctionnement et rôles

Et modélisation d'un STATCOM

2.1 Introduction

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementales, écologiques et économiques de reconstructions de nouvelles lignes, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transfert. Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs à base d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique.

Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse (moins d'une seconde). Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité. Le concept FACTS est né pour répondre aux différentes difficultés croissantes de transmission dans les réseaux et surtout la maîtrise de transit de puissance (compensateur de puissance réactive, variateur de charge universel...) ces dispositifs peuvent améliorer le comportement dynamique des réseaux électriques [7]

2.2 Dispositif FACTS

2.2.1 Définition et le rôle d'un dispositif FACTS

Les concepts FACTS « Flexible Alternative Currents Transmission Systems » sont des dispositifs statiques, utilisés pour la transmission et la conversion de l'énergie électrique alternative ou continue. Ils sont composés de transformateurs, d'éléments passifs (capacités, inductances), de composants de puissance (de type thyristor ou transistor) et d'un contrôle spécifique à leur application. Leur fonctionnement repose sur le principe de la compensation

parallèle, la compensation série ou la combinaison des deux afin de réaliser les fonctions suivantes [7]

- Augmenter la stabilité réseau en cas de défaut ou pendant les phases transitoires.
- Contrôler dynamiquement la tension réseau et réduire les perturbations.
- Augmenter et contrôler le transfert d'énergie d'une source à une autre.
- Amortir les oscillations entre les générateurs et les résonances subsynchrones qui apparaissent entre la turbine et la génératrice électrique.
- Ainsi, plusieurs études ont été menées pour connaître les avantages liés à l'utilisation des dispositifs FACTS dans les réseaux pour:
 - Le support du profil de la tension
 - L'amélioration de la stabilité statique et dynamique
 - L'amortissement des oscillations subsynchrones

Ces avantages découlent principalement de l'augmentation des capacités de transit des lignes existantes par un contrôle rigoureux des différentes variables du réseau. Pour fixer les idées, nous pouvons prendre un exemple simple:

Considérons le transit de puissance sur une ligne à courant alternatif. Cette ligne est représentée sur la figure (2.1) les pertes étant supposées nulles, la puissance transmise P est fonction des amplitudes des tensions E_1 et E_2 aux extrémités de la ligne, du déphasage δ_{12} entre ces deux tensions et de l'impédance x de la ligne, comme le montre l'équation

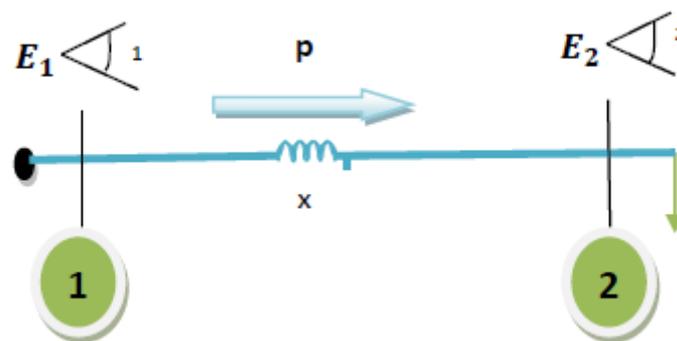


Figure 2.1. Ligne de transport à courant alternatif

$$P = \frac{E_1 E_2}{X} \sin \delta_{12} \quad (2.1)$$

Cette équation montre que la puissance transmissible par une ligne est limitée par les paramètres énoncés ci-dessus et pas forcément par sa limite thermique. De plus, il découle de cette équation que si l'on peut régler un, deux ou les trois paramètres, on contrôle alors le transit de puissance dans la ligne [8].

Elle montre aussi qu'il est possible d'augmenter la puissance transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, soit en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ses paramètres, les FACTS permettent un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions, de réduire les coûts et d'allonger la durée de vie des équipements [9].

2.2.2 Nécessité des dispositifs FACTS

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quel que soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé.

Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs a diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [9].

2.2.3 Classification des dispositifs FACTS:

Le tableau 2.1, représente les grandes catégories des dispositifs FACTS de contrôle des réseaux électriques. La colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composants de base R L C et transformateurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commandés avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

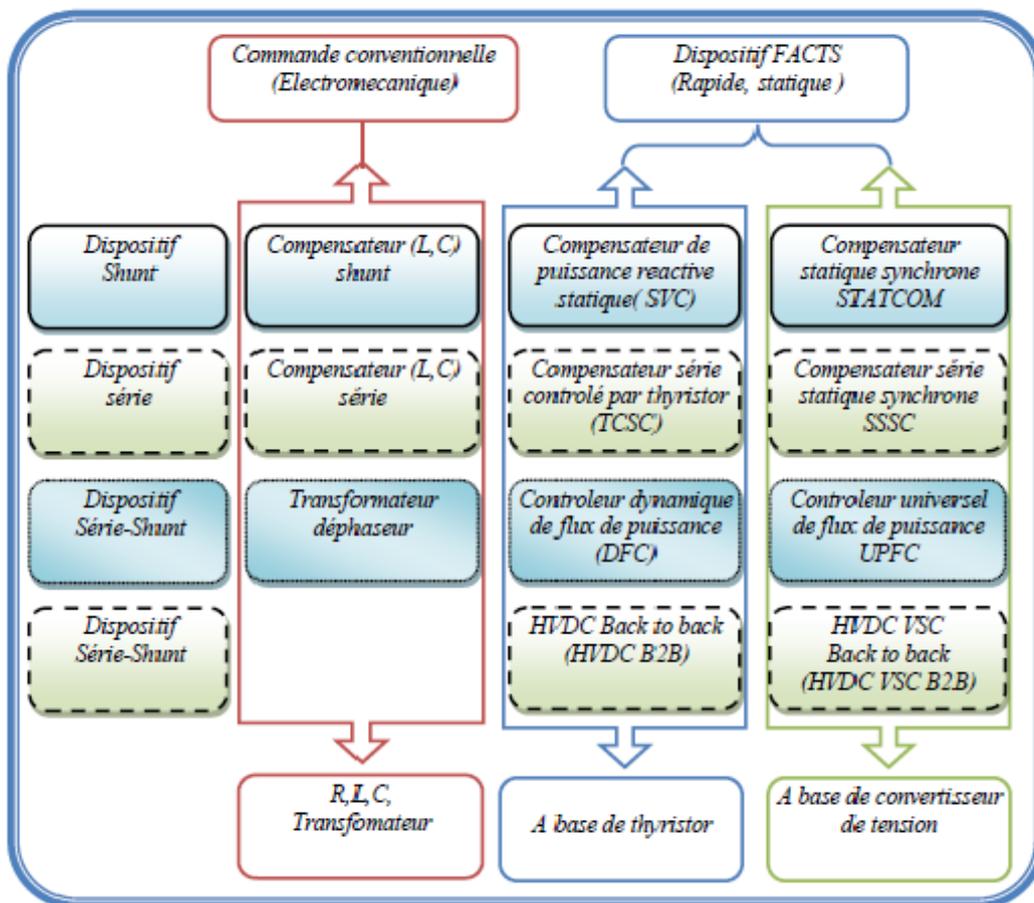


Tableau 2.1. Principaux dispositifs des FACTS

La colonne gauche présente les contrôleurs FACTS à base des thyristors ou bien des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connus depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux. [9]

Les dispositifs dans la colonne droite, sont des FACTS les plus avancées avec des convertisseurs de source de tension **VSC (Voltage Source Converter)** à base des interrupteurs statiques sophistiqués **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors)** ou bien les **IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors)** tel que le **STATCOM, SSSC** et l'**UPFC**.

Ces **VSC** fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau.

Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau.

2.2.4 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Les différents dispositifs FACTS présentés dans ce chapitre possèdent tous leurs propres caractéristiques tant en régime permanent qu'en régime transitoire. Chaque type de dispositif sera donc utilisé pour répondre à des objectifs bien définis. Des considérations économiques entrèrent également dans le choix du type d'installation à utiliser. Le tableau (II.2) synthétise les principaux bénéfices techniques des nouvelles technologies de FACTS. Le nombre "+" est proportionnel à l'efficacité du dispositif

DISPOSITIF	Contrôle du transit de puissance	Contrôle de la tension	Stabilité transitoire	Stabilité statique
STATCOM et SVC	+	+++	++	++
TCSC	++	+	+++	++
UPFC	+++	++	+++	++

Tableau 2.2. Bénéfices techniques des dispositifs FACTS

	Problème	Action à mener	Solution conventionnel	Dispositifs FACTS
Limite des tensions	Chut ou surtension	Fourniture ou absorption de l'énergie réactive	Condensateurs séries et shunts	SCV STATCOM
Limite thermique	Surcharge des lignes	Réduction des charges	Ajouter de nouvelles lignes	TCSC UPFC SVC
Courants de boucles	Répartition de la puissance transférée	Réajustement de la réactance de ligne	Ajouter des condensateurs en série	TCSC UPFC SVC
Niveaux des court-circuités	Courant de court-circuit très élevé	Limitation de courant de court-circuit	Ajouter des condensateurs en série	TCSC UPFC
Résonances subsynchrones	Emballlement des générateurs	Atténuation des oscillations	Compensation série	TCSC

Tableau 2.3. Le rôle des différents dispositifs FACTS

2.2.5 Fonctionnement des FACTS :

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive (courant réactive) sur le réseau.

Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximal transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques (c'est faux, car ils ont des sources d'harmoniques à cause des composants EP) et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelque MVA à quelques centaines de MVA.

Ils s'appliquent dans deux secteurs principaux :

- Réseau de transport
- Réseaux Industriels

- **Réseau de transport**

Pour améliorer le contrôle, augmenter la capacité des puissances transmissibles et assister à la récupération du réseau suite à un défaut.

- **Réseaux Industriels**

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission.

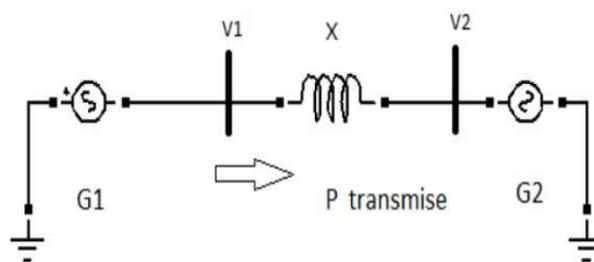


Figure 2.2. Puissance transitée entre deux réseaux.

2.2.6 Historique des dispositifs FACTS

Depuis les premiers compensateurs, trois générations de dispositifs FACTS ont vu le jour. Elles se distinguent par la technologie des semi-conducteurs et des éléments de puissance utilisés.

- **Premier Génération :**

Basée sur les thyristors classiques. Ceux-ci sont généralement utilisés pour enclencher ou déclencher les composants afin de fournir ou absorber de la puissance réactive dans les transformateurs de réglage.

- **Deuxième Génération :**

Dite avancée, est née avec l'avènement des semi-conducteurs de puissance commandés à la fermeture et à l'ouverture, comme le thyristor GTO.

Ces éléments sont assemblés pour former les convertisseurs de tension ou de courant afin d'absorber ou d'injecter des courants (tensions) contrôlables dans le réseau.

▪ **Troisième Génération :**

FACTS utilisant des composants hybrides et qui sont adaptée à chaque cas.

Contrairement aux deux premières générations, celle-ci n'utilisent pas des dispositifs auxiliaires encombrants tels que des transformateurs pour le couplage avec le réseau.

2.2.7 Coût des dispositifs FACTs

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que :

- Les performances requises.
- La puissance de l'installation.
- Le niveau de tension du système.
- La technologie du semi-conducteur utilisé.

Contrôleurs FACTS	Cout (US/\$)
Condensateur shunt	8\$/Kvar
Condensateur série	20\$/Kvar
SVC	40\$/Kvar
TCSC	40\$/Kvar
STATCOM	50\$/Kvar
UPFC partie série	50\$/Kvar
UPFC partie shunt	50\$/Kvar

Tableau 2.4. Comparaison des coûts des contrôleurs FACTS

2.2.8 Les avantages, les inconvénients et les contraintes de la technologie des dispositifs FACTS

▪ Les avantages des dispositifs FACTS

- Contrôle le transit de la puissance active.
- Augmente la sécurité des systèmes énergétiques (augmentation de la limite de la stabilité transitoire, amortissement des oscillations ...)
- Réduit le transit de l'énergie réactive.
- Optimise les puissances générées, donc réduit le coût de production de l'énergie.
- Agir comme filtre actif.
- Améliorée l'interconnexion et l'échange énergétique.

▪ Les inconvénients

L'introduction des harmoniques du réseau électrique ce qui le rend pollué, c'est-à-dire le signal sera tendu et non sinusoïdale. Il rend le réseau vulnérable à la surtension due aux commutations répétitives.

▪ Les contraintes des dispositifs FACTS

Les dispositifs FACTS sont considérés comme des solutions pour aider les systèmes électriques, mais ils présentent des inconvénients, en plus qu'ils ne sont pas une solution universelle, ils existent plusieurs contraintes pour que ces dispositifs soient efficaces et rentables [12] :

- Le choix du FACTS ;
- Le choix du modèle du FACTS ;
- Choix de la localisation des FACTS ;
- Protection pour les FACTS et pour le réseau ;
- Interactions entre les dispositifs FACTS et les autres éléments.

Nous avons décidé, pour la suite de notre travail, de ne pas étudier l'impact de chaque catégorie des FACTS dans un réseau électrique. Notre choix s'est porté sur l'étude du **Compensateur Statique Synchron (STATCOM)**.

Il nous a semblé raisonnable d'essayer d'analyser l'impact de la compensation shunt et de la compensation série de façon séparée avant de regrouper l'étude de ces concepts FACTS à l'aide de la compensation hybride.

2.3 Structure des principaux dispositifs FACTS

2.3.1 Compensateurs hybrides série – parallèle :

C'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie.

a. Compensateurs hybrides à base de GTO Thyristors

❖ Contrôleur de Transit de Puissance Unifié (Unified Power Flow Controller- UPFC)

L'UPFC est constitué de deux onduleurs de tension triphasés, l'un est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur et l'autre est connecté en série à travers un deuxième transformateur. Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par le condensateur. Gygyi a présenté le concept de ce compensateur en 1990. L'originalité de ce dispositif est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique à savoir : la tension, l'impédance de la ligne déphasage

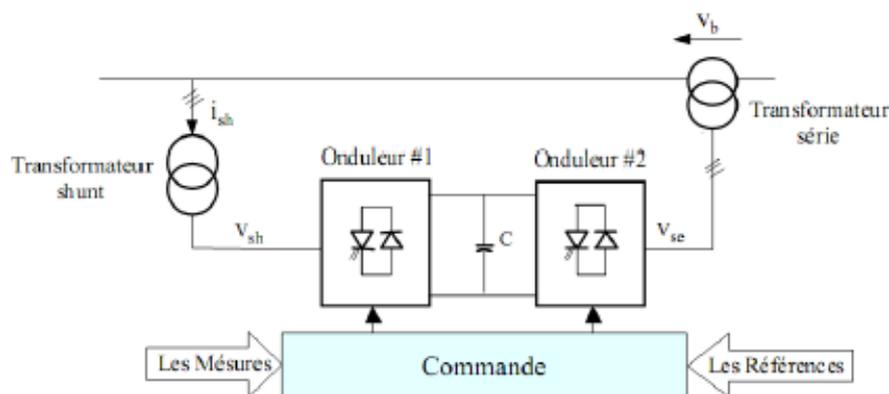


Figure 2.3. Schéma équivalent d'un UPFC

2.3.1 Les dispositifs Série :

a. Compensateurs Série à basse thyristor :

Ces dispositifs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En générale, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celle-ci.

❖ Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC):

TCSC (Thyristors Controlled Séries Condensateur) est un dispositif de compensation série à base d'électronique de puissance. Il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur, l'ensemble monté en parallèle avec une capacité comme montre la figure (2.4). Connectes-en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance X_{TCSC} qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par l'équation (2.2).

Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80.

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jLW}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - LCW^2}$$

2.2

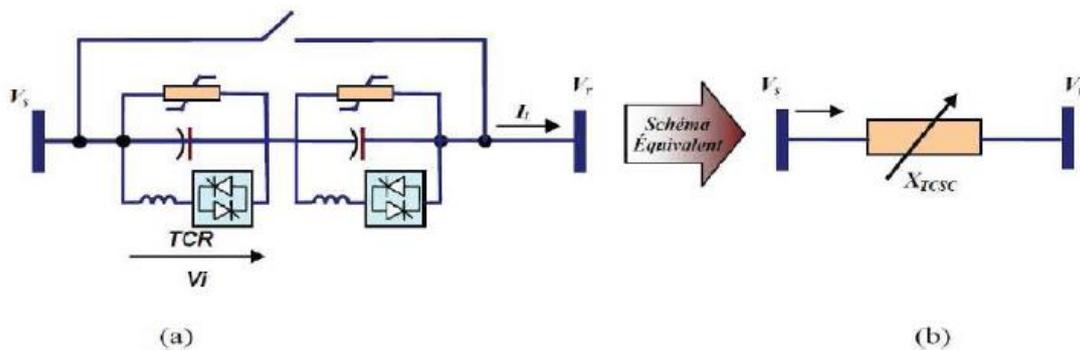


Figure 2.4. (a) structure d'un TCSC, (b) Schéma équivalent.

La puissance transmise entre deux jeux de barres du réseau est donnée par l'équation (2.3)

$$P_{sr} = \frac{|V_s||V_r|}{X_{TCSC}} \cdot \sin(\theta_s - \theta_r) \quad 2.3$$

2.3.2 Les dispositifs parallèles (shunt) :

En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie Les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [1].

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

a. **Compensateurs parallèles à basse thyristor :**

IL s'agit de:

- ❖ **SVC (Static Var Compensator)** est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau.

Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs batteries de condensateurs fixes (CF) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (**Thyristor Switched Capacitor TSC**) et d'un banc de réactances contrôlable (**Thyristor Controlled Reactor TCR**) et ou bien par des réactances commutables (**Thyristor Switched Reactor TSR**), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques.

Pour avoir un temps de réponse plus rapide et pour éliminer les parties mécaniques, les TCR (Réactances commandés par thyristor) ont fait leur apparition vers la fin des années soixante. Elles sont constituées d'une inductance en série avec un gradateur (deux thyristor tête-bêche). Chaque thyristor conduit pendant moins demi-période de la pulsation du réseau.

Le retard à l'amorçage permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif. (Figure 2.5)

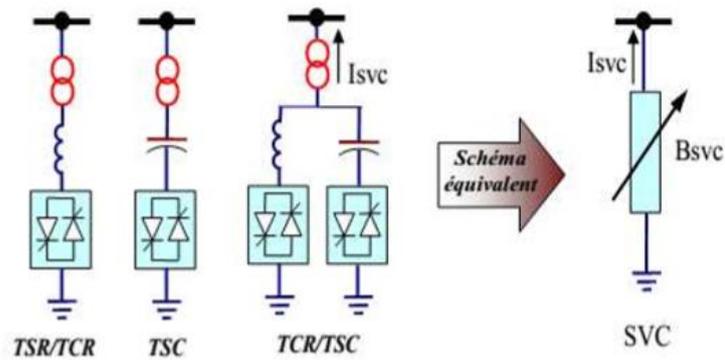


Figure 2.5. Schéma du SVC.

b. Compensateurs parallèles à basse GTO (convertisseur de tension) :

Il s'agit de :

❖ **STATCOM (STATIC COMPensator)**

Ce type de compensateur shunt (compensateur statique synchrone) a connu jusqu'à présent différentes appellations :

- ASVC (Advanced Static Var Compensator);
- SVG (Static Var Generator);
- SVClight;
- SVCplus.



Figure 2.6. STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension au jeu de barres (nœud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique en constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Pour un STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation (2.4) décrit le transfert de puissance réactive dans le réseau électrique.

Si $|V_k| > |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne positive et le STATCOM absorbe la puissance réactive.

Si $|V_k| < |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne négative et le STATCOM fournisse la puissance réactive.

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \quad (2.4)$$

Le STATCOM présente plusieurs avantages :

- Un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système ;
- Bonne repense à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle ;
- Bonne repense dynamique c.à.d. le système reprend instantanément.

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu. C'est un convertisseur de tension à base des thyristors GTO ou IGBT alimenté par des batteries de condensateurs. L'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage. Le principe de ce type de compensateur est connu depuis la fin des années 70, mais ce n'est que dans les années 90 que ce type de compensateur a connu un essor important grâce aux développements des interrupteurs GTO de forte Puissance. La figure (2.6) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle du STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance de fuite du transformateur de couplage

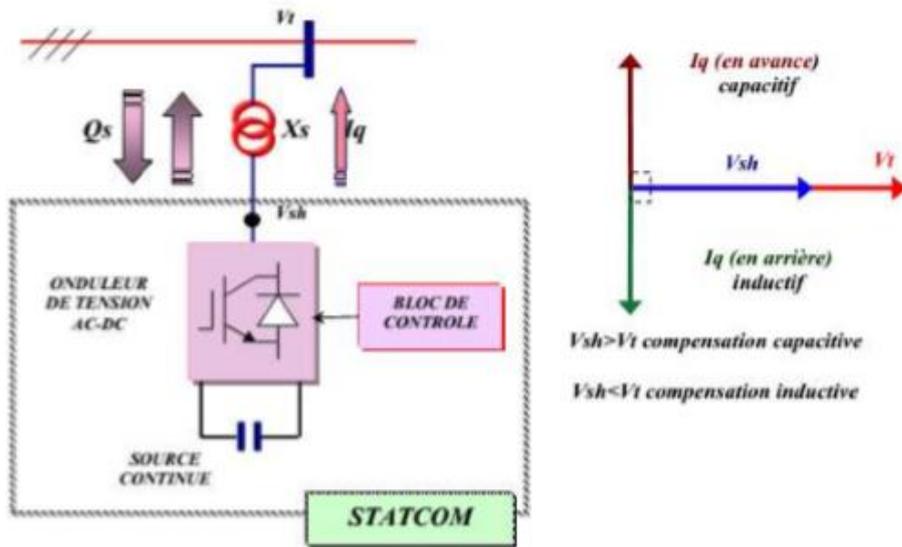


Figure 2.7. STATCOM (Static Synchronous Compensator)

- **Principe de Fonctionnement**

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasé synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau. En général la tension du STATCOM est injectée en phase avec la tension de la ligne et dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le STATCOM comme le résume la figure 2.6. [9] [11].

Soit le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par la figure (2.7). [13]

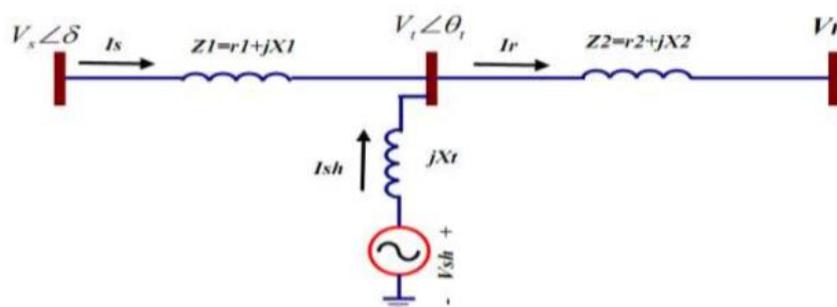


Figure 2.8. Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique

Le courant injecté par le STATCOM est donné par :

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad 2.5$$

La puissance injectée au jeu de barre "t" est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \bar{I}_{sh}^* = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{sh}^* - \bar{V}_t^*)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \bar{V}_{sh}^* - V_t^2}{-jX_t} \quad 2.6$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules qui suivent :

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad 2.7$$

$$Q_{sh} = V_t (V_{sh} \csc(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad 2.8$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau.

$$\text{Donc : } P_{sh} = -V_t V_{sh} \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0 \quad 2.9$$

$$\text{D'où la condition } (\theta_t - \theta_{sh}) = 0 \text{ donc } \theta_t = \theta_{sh} \quad 2.10$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM \bar{V}_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement. [5][8] [11].

Cependant il y a toujours, dans la pratique, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constant.

Comme les tensions V_{sh} et V_t (Figure 2.7) sont en phase le courant I_{sh} du STATCOM, en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations suivantes:

En admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe d (comme référence des phases):

$$V_{shd} = V_{sh} \quad , \quad V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{shq} = \frac{V_{sh} V_t}{X_t} \quad 2.11$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{shq} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right)$$

2.12

A partir de l'équation (2.12) il paraît clair que si le module de la tension du STATCOM V_{sh} égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$, donc $Q_{sh} > 0$, le STATCOM en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau. Figure 2.8.a.

Si $V_{sh} < V_t$, donc $Q_{sh} < 0$, le STATCOM en mode inductif et absorbe une puissance réactive du réseau. Figure 2.8.b.

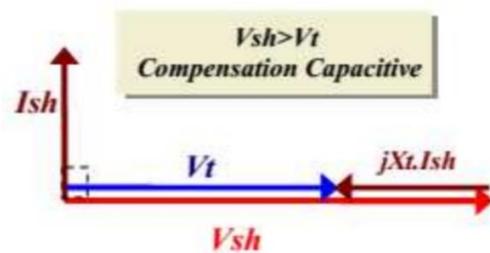
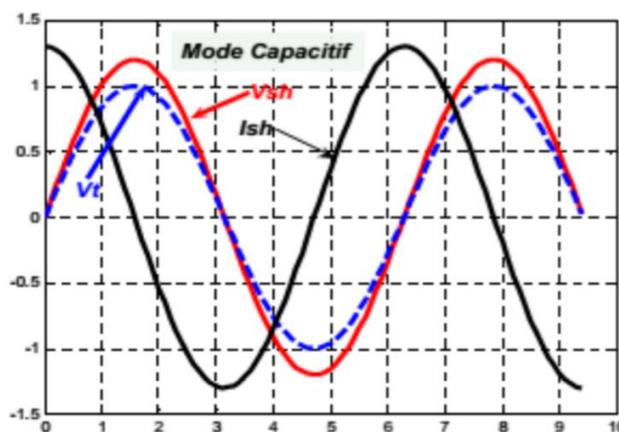


Figure 2.9.a. Courbes simulées du courant et tensions en mode capacitif

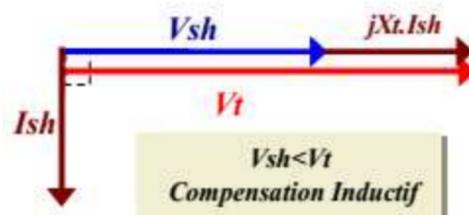
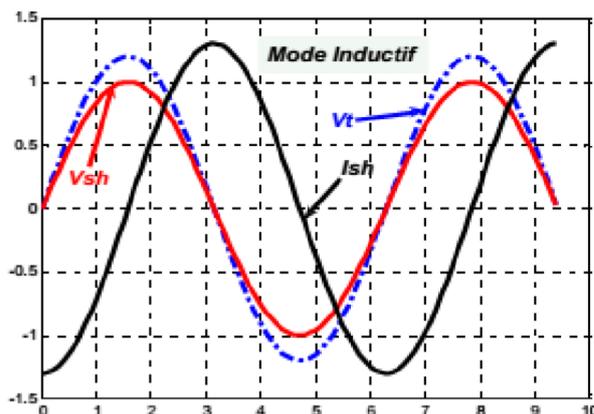


Figure 2.9.b. Courbes simulées du courant et tensions en mode inductif

NB : La puissance nominale du STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

II.4.1.2.2 Effet de la compensation shunt (STATCOM) sur le réseau électrique

Pour étudier les relations entre les réseaux électriques et le STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure 2.6 qui représente le schéma unifilaire d'un réseau électrique et d'un STATCOM installé dans une ligne de transport. Les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r sont les suivants :

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad 2.13$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad 2.14$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t\bar{V}_s - \bar{Z}_1\bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad 2.15$$

Les puissances injectées par la source Vs peuvent être calculée à partir des équations:

$$P_s = R_e(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = R_e \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad 2.16$$

$$Q_s = I_m(\bar{V}_s \cdot \bar{I}_s^*) = I_m \left[\bar{V}_s \cdot \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t)\bar{V}_s - \bar{Z}_2\bar{V}_{sh} - jX_t\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad 2.17$$

Les puissances délivrées par le STATCOM données par les équations 2.8 (a) et (b) sont représentées sur la figure 2.9.

$$P_s = R_e(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = R_e \left[\bar{V}_{sh} \cdot \left(\frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad 2.18$$

$$Q_s = I_m(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = I_m \left[\bar{V}_{sh} \cdot \left(\frac{-\bar{Z}_2\bar{V}_s + (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)\bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1\bar{V}_r}{\bar{Z}_1\bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad 2.19$$

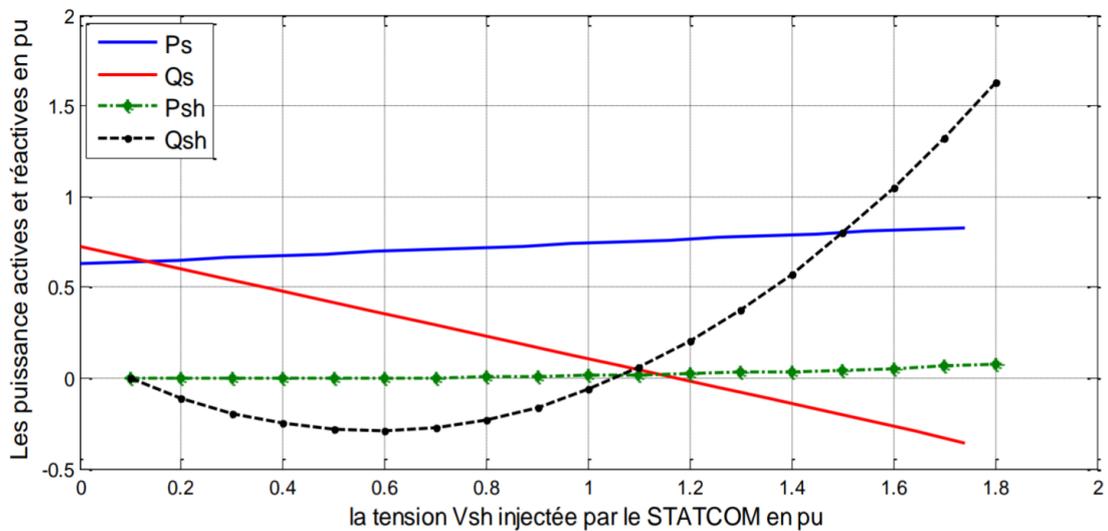


Figure 2.10. P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}

Sur la caractéristique de la figure 2.9 qui représente la variation des puissances active et réactive P_s et Q_s transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive injectées par le STATCOM P_{sh} et Q_{sh} , en fonction des variations de l'amplitude de la tension V_{sh} il paraît clair que l'influence de la tension V_{sh} sur la puissance réactive Q_s est plus grand que sur la puissance P_s . Et on voit qu'en augmentant la tension V_{sh} la puissance réactive injectée par le **STATCOM** augmente et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue.

Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. [11] [12] [14]

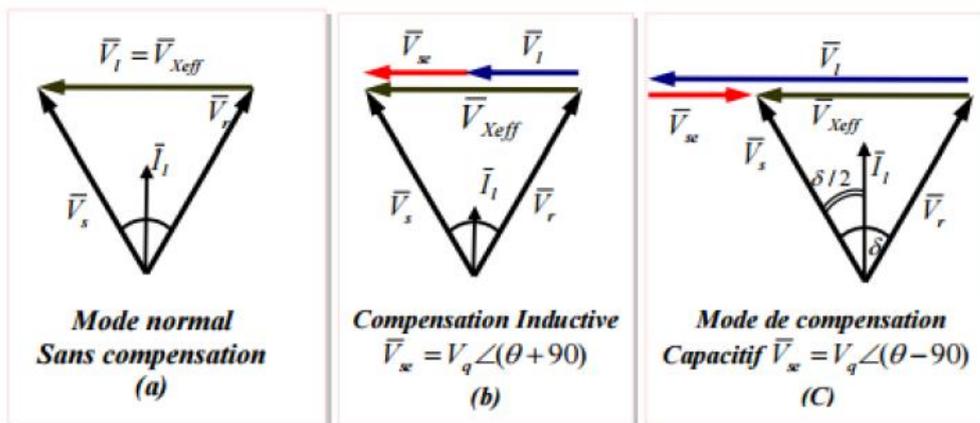


Figure 2.11. Diagrammes de phase des différents modes de fonctionnement du STATCOM

2.4 Modélisation du STATCOM

Les modèles mathématiques des convertisseurs de tension pour les différentes connexions dans un réseau électrique, série ou parallèle, sont très utiles sinon obligatoire pour analyser leurs fonctionnements et déterminer des lois de commande des dispositifs (FACTS) à base de ces convertisseurs.

La description mathématique est basée sur la transformation du système tri phase à un système biphase orthogonal stationnaire ou tournant au synchronisme par les transformations de CONCORDIA et PARK respectivement afin d'aboutir à un système d'équations différentielles d'état dans le plan (d,q) (Annexe). Pour cette modélisation nous avons opté pour les hypothèses suivantes :

- Tous les interrupteurs sont supposés idéals.
- Les trois tensions de la source alternative sont équilibrées.
- Les harmoniques causées par l'action d'ouverture et de fermeture des interrupteurs sont négligées et on ne considère que le fondamentale.
- L'inductance de fuite du transformateur de couplage Parallèle du STATCOM est représentée par l'inductance L_p .
- Pour simplification du modèle mathématique le système d'unité relative est adopté où les grandeurs I_B et U_B sont des grandeurs de base :

Donc:

$$I_{PU} = \frac{I}{I_B}; \quad U_{PU} = \frac{U}{U_B}; \quad Z_{PU} = \frac{Z}{Z_B}$$

$$L_{PU} = \frac{X_{PU}}{W_B}; \quad R_{PU} = \frac{R}{Z_B}; \quad C_{PU} = \frac{1}{W_B C Z_B}$$

ω : est la vitesse angulaire de la composante fondamentale de la tension du réseau.

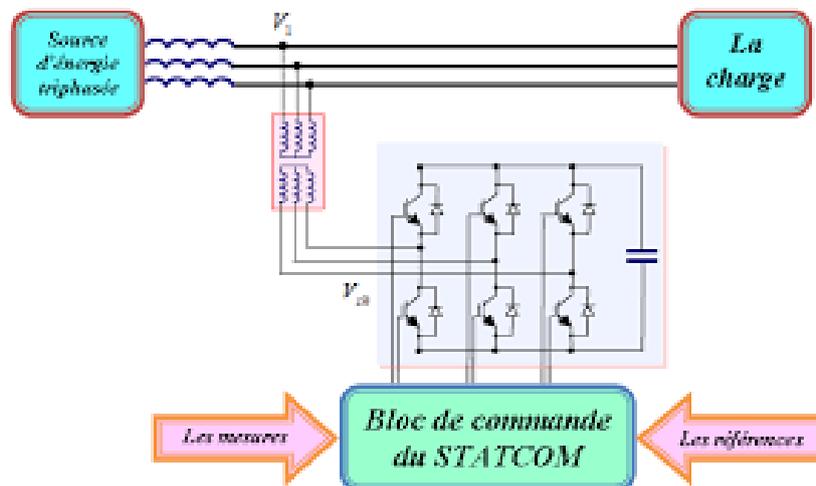


Figure 2.12. Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau

2.4.1 Modèle mathématique simplifié

Le STATCOM, comme il était déjà décrit dans le chapitre précédent, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure 2.11 en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecté ce dispositif pour le modèle simplifié du

STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent de ce dispositif donc est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage ; le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur. [9] Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. [10]

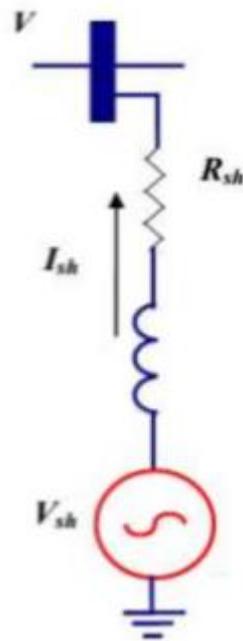


Figure 2.13. Schéma équivalent de STATCOM

En appliquant la loi d'ohm on a:

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad \mathbf{2.20}$$

Où les grandeurs sont en triphasé :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} ; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{sha} \\ V_{shb} \\ V_{shc} \end{bmatrix} ; \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{sha} \\ I_{shb} \\ I_{shc} \end{bmatrix}$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β), on multipliant l'équation (2.20) par la matrice de la transformation de CLARK suivante :

$$T_{\alpha\beta} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tous les grandeurs par le phasor $e^{-j\gamma}$ avec $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$ la pulsation des grandeurs en question voir la figure 2.13 (Annexe).

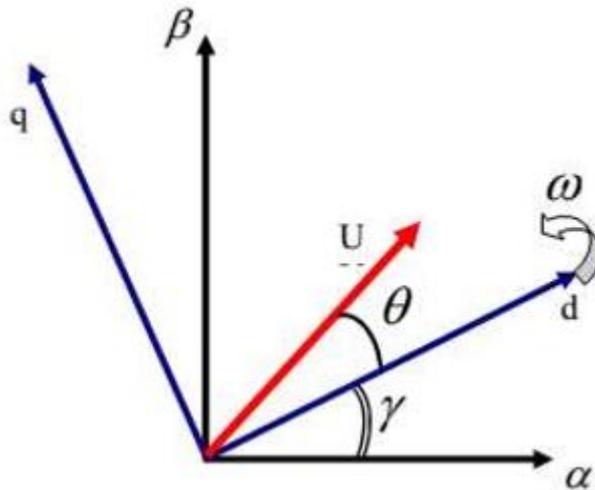


Figure 2.14. Passage du repère (α, β) vers le repère (d, q).

Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad \text{et inversement} \quad \bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}$$

En appliquant cette écriture sur l'équation (3.1) on aura :

$$\bar{V}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} e^{j\gamma} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d(\bar{I}_{sh}^{(d,q)} e^{j\gamma})}{dt} \quad \mathbf{2.21}$$

Après simplification de calcul en aboutit aux équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q) suivante : [16] [9]

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shq} \quad \mathbf{2.22}$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} + L_{sh} \cdot \omega \cdot I_{shd} \quad 2.23$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du STATCOM comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad 2.24$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système :

2.4.2 Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquent maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant, qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants ($I_{shd}^{ref}, I_{shq}^{ref}$) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

2.4.3 Détermination des références

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{shd}^{ref} calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active $P_{sh}^{ref} \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur. [16]

$$P_{sh}^{ref} = \frac{3}{2} (V_d I_{shd}^{ref} + V_q I_{shq}^{ref}) \quad 2.25$$

$$Q_{sh}^{ref} = \frac{3}{2} (V_q I_{shd}^{ref} - V_d I_{shq}^{ref}) \quad 2.26$$

L'écriture matricielle de l'équation ci-dessus est la suivante :

$$\begin{bmatrix} P_{sh}^{ref} \\ Q_{sh}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{3}{2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & -V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd}^{ref} \\ I_{shq}^{ref} \end{bmatrix} \quad 2.27$$

Ces puissances (2.27) qui sont les images des courants I_{shd}^{ref} et I_{shq}^{ref} actives et réactive, qu'on détermine depuis l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^{ref} \\ I_{shq}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{sh}^{ref} \\ Q_{sh}^{ref} \end{bmatrix} \quad 2.28$$

Où les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre. Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par la figure suivante :

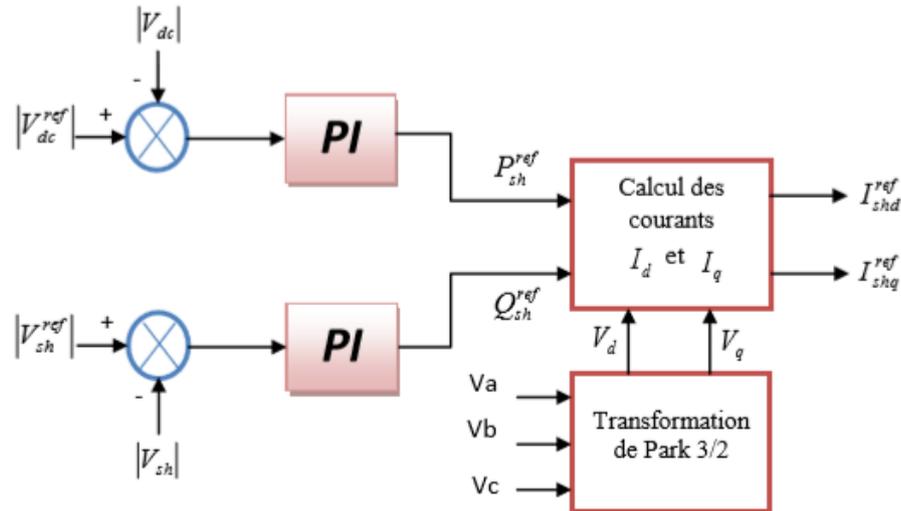


Figure 2.15. Identification des courants de référence

2.4.4 La Méthode Watt Var découplée

Considérant le modèle simplifié représenté par le système d'équation (2.28) précédent

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix} \quad 2.29$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d - V_{shd} \\ V_q - V_{shq} \end{bmatrix}$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}$ représente les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (III.5) on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} + X_1 \quad 2.30$$

En appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on obtient :

$$\left(S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{shd} = \omega I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad 2.31$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} en fonction de \tilde{X}_1 suivant :

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad 2.32$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega I_{shq} + X_1$, on doit ajouter donc le terme ωI_{shq} pour retrouver \tilde{X}_1 à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure 2.15 suivante :

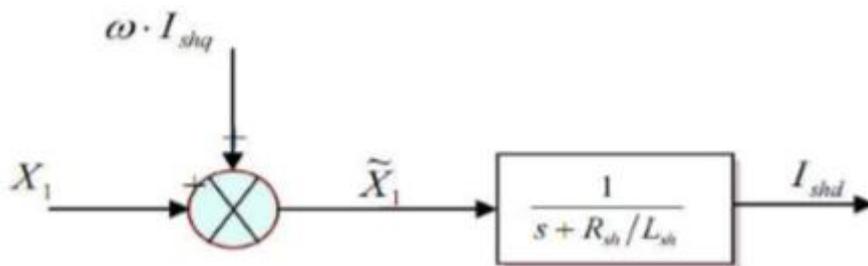


Figure 2.16. le transfert I_{shd} en fonction de X_1

De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le

Transfert I_{shq} en fonction de X_2 qui suit :

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{S + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad 2.33$$

Avec : $\tilde{X}_2 = -\omega \cdot I_{shd} + X_2$

Le schéma suivant résume ce transfert :

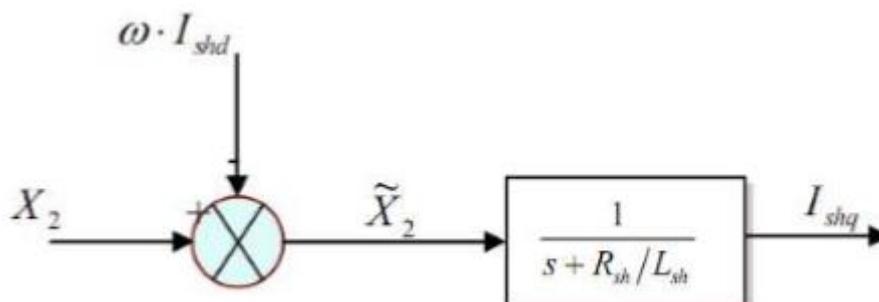


Figure 2.17. le transfert I_{shq} en fonction de X_2

De ce qu'on vient de voir on constate qu'il y a un couplage naturelle dans les transferts des courants I_{shd} et I_{shq} . Pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du **STATCOM** et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^{ref} et I_{shq}^{ref} comme le représente le schéma bloc de la figure (3.6).

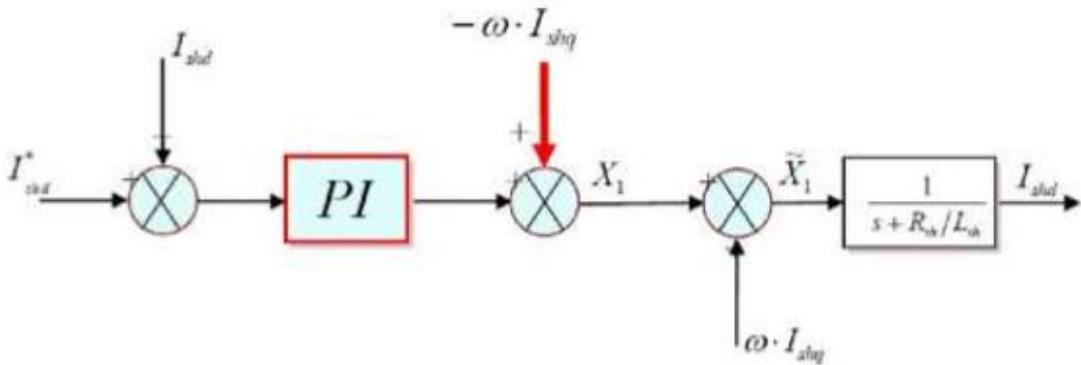


Figure 2.18. Régulation et découplage de I_{shd}

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante $\omega \cdot I_{shd}$ et finalement arriver au schéma de régulation du **STATCOM** par la méthode Watt-Var découplée de la figure (2.18).

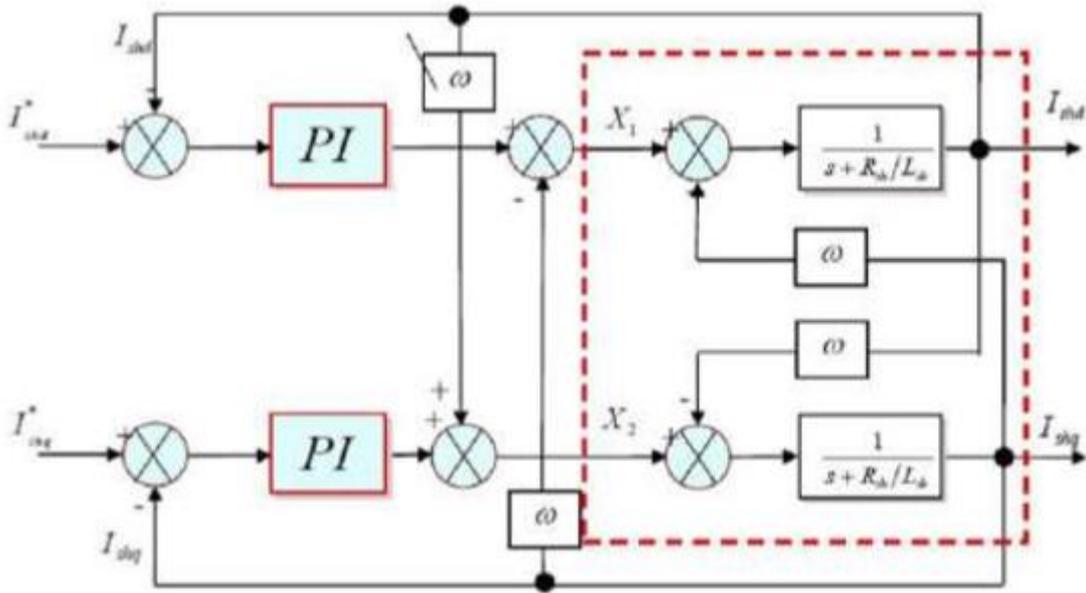


Figure 2.19. Schéma de Régulation du STATCOM (Watt-Var découplée).

2.4.5 Régulateur PI avec compensation de pôles

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du **STATCOM** des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (2.19) :

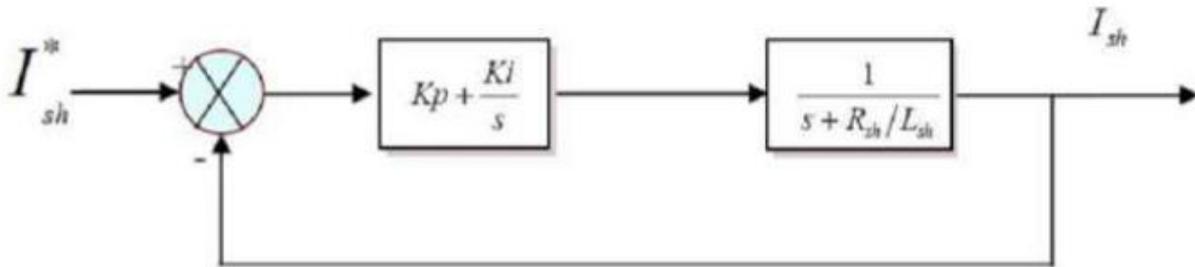


Figure 2.20. Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM.

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est :

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad 2.34$$

Et par compensation de pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad 2.35$$

Et $G(s)$ devient : $G(s) = K_p \left(\frac{1}{s} \right)$

T_{BO} Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit :

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{T_{BF}s+1} \quad 2.36$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p}$$

Avec T_{BF} est la constante de temps de la régulation en boucle fermée. En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (3.16 et 18) les gains du contrôleur PI.

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \text{ et } K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad 2.37$$

2.4.6 Régulation de la tension continue U_{dc}

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation suivante : [16] [9] [10].

$$p_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \longrightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 \times P_{sh}}{C} \quad 2.38$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C \times s} \quad 2.39$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique [10].

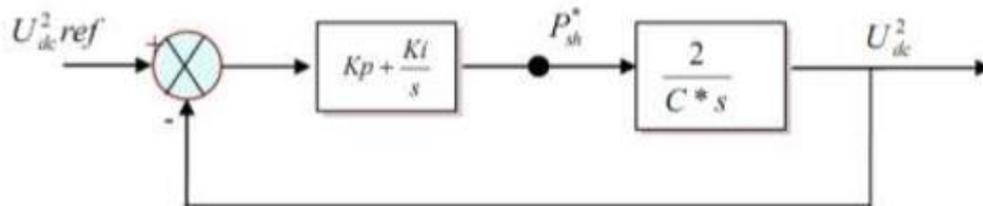


Figure 2.21. Régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc-ref}^2} = \frac{\frac{2K_p}{C}s + \frac{2K_i}{C}}{s^2 + \frac{2K_p}{C}s + \frac{2K_i}{C}} \quad 2.40$$

$$\text{Avec : } \omega_n^2 = \frac{2K_i}{C}$$

$$\xi = K_p \sqrt{\frac{1}{2CK_i}} \quad 2.41$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons

choisi $\xi = 0.7$

Et afin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir $\omega_n = \frac{2\pi \times 300}{10}$ rad/sec, et finalement on détermine à partir des équations (2.37) les valeurs des gains K_p et K_i .

2.4.7 Commande de l'Onduleur

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sortie que les tensions créent par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Deux méthodes de commandes peuvent être utilisées :

a. Commande par MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion)

La modulation de largeur d'impulsion est réalisée par la comparaison d'une onde modulée basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse comme le montre le schéma de principe de la figure 2.21. [18] [16]

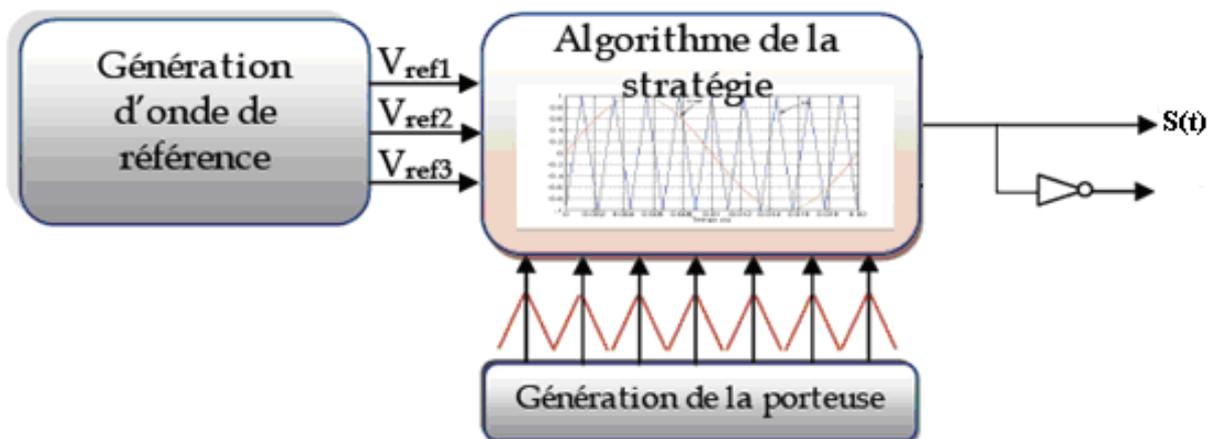


Figure 2.22. Principe de l'MLI Sinus-Triangle

b. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis.

Celui-ci, produit des impulsions d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur, de façon à limiter le courant de phase dans une bande d'hystérésis autour du courant de référence (Figure 2.22).

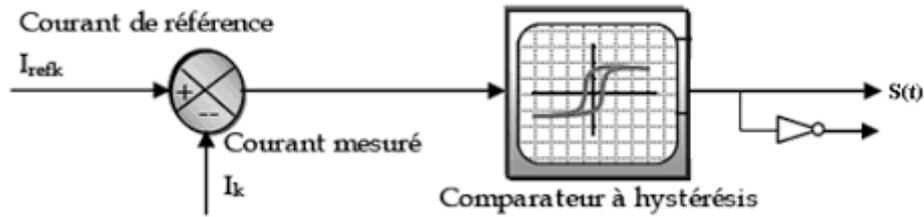


Figure 2.23. Principe de la commande par hystérésis

3.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre, en premier lieu, le concept FACTS, ainsi, nous avons donné une brève description et des définitions des divers types de dispositifs FACTS. Cette description est adoptée comme classification universelle des systèmes FACTS, et finalement on parler sur la modélisation des contrôleurs de la famille FACTS "STATCOM" dans certaines fonctions de contrôle : la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive et le contrôle du flux de puissance active et réactive.

Nous avons présenté dans ce chapitre des modèles simples pour lesquels nous avons identifié les références de leurs systèmes de commande de dispositif.

La loi de commande utilisée pour ce contrôleur été la méthode dite Watt-Var découplée basée sur le principe de découplage dans le contrôle des courants actif et réactif du système accompli avec des régulateur PI par compensation des pôles.

Chapitre 3

Application

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire une simulation sur un réseau dans son état normal, puis nous provoquerons un défaut du réseau et verrons les changements dans les résultats, puis nous ajouterons STATCOM au réseau et ensuite nous examinerons également les nouveaux résultats et enfin nous ferons une comparaison sous forme de courbe graphique et discuterons des résultats finaux.

3.2 Le Power System Analysis Toolbox (PSAT)

3.2.1 PSAT ?

PSAT (Power System Analysis TOOLBOX) est un logiciel destiné à l'analyse et l'étude des réseaux électriques. Il est développé sous MATLAB par Mr. Federico Milano ; Professeur, Docteur à l'université de Castilla-La Mancha, Ciudad Real, Spain.

PSAT bénéficie largement des remarques et observations des chercheurs spécialisés dans le réseau électrique via leurs contributions dans le forum de ce dernier [20]. Pour cela, il a connu des améliorations remarquables d'une version à une autre.

PSAT est un logiciel, simple, intéressant, qui englobe plusieurs domaines de recherche dans l'étude et l'analyse des réseaux électriques. La manipulation de PSAT peut être effectuée, soit par l'interface graphique, soit par la programmation en ligne en utilisant leurs fonctions prédéfinies.

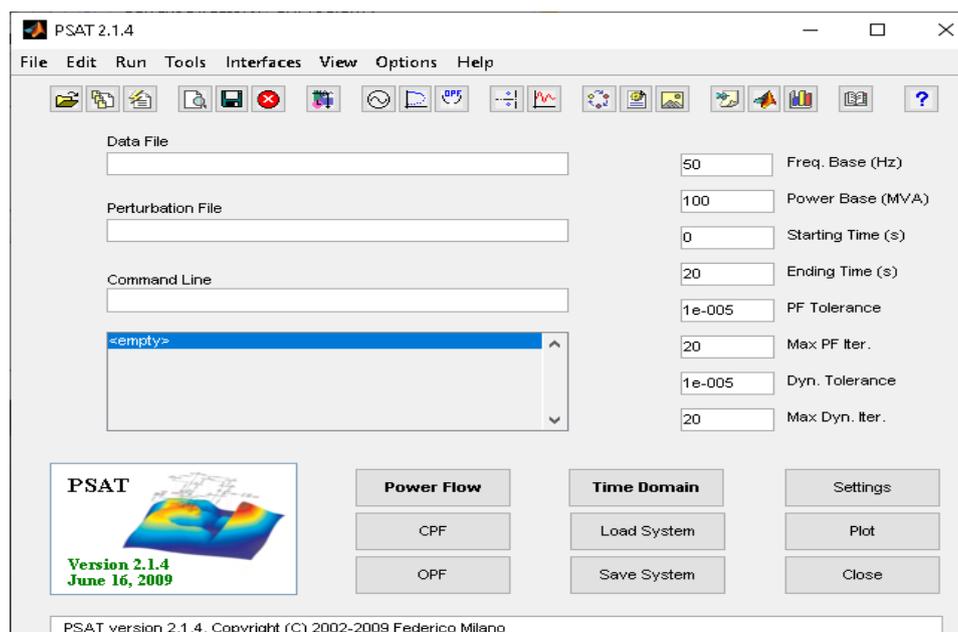


Figure 3.1. Page d'accueil du PSAT

3.3.2 Calcul de l'écoulement de la puissance

Le calcul de l'écoulement de la puissance est une étape nécessaire pour l'étude de stabilité d'un réseau électrique. Il est effectué en premier lieu pour la détermination des conditions initiales du système avant l'emplacement des compensateurs.

Calcul de l'écoulement de la puissance d'un réseau à l'état de l'équilibre :

Noeud	V [p.u.]	Phase [rad]	P généré [p.u.]	Q généré [p.u.]	P consommé [p.u.]	Q consommé [p.u.]
Noeud	1,06	0	3,52054706	-0,27942846	0	0
Noeud2	1,045	-0,13564169	0,4	0,9531983	0,3038	0,1778
Noeud3	1,01	-0,33196397	0	0,59933222	1,3188	0,266
Noeud4	0,99749547	-0,26398031	0	0	0,6692	0,056
Noeud5	1,00239178	-0,22713395	0	0	0,1064	0,0224
Noeud6	1,07	-0,39619692	0	0,45685837	0,1568	0,105
Noeud7	1,03492258	-0,36155003	0	0	0	0
Noeud8	1,09	-0,36155003	0	0,34081317	0	0
Noeud9	1,01174402	-0,41098319	0	0	0,413	0,2324
Noeud10	1,01116125	-0,41541771	0	0	0,126	0,0812
Noeud11	1,03505625	-0,40862198	0	0	0,049	0,0252
Noeud12	1,04610429	-0,417589	0	0	0,0854	0,0224
Noeud13	1,03635533	-0,418822	0	0	0,189	0,0812
Noeud14	0,99616665	-0,4404966	0	0	0,2086	0,07

Tableau 3.1 Niveaux de tensions, puissances injectées et consommées

Les tensions de chaque jeu de barre d'un réseau normal sont données comme suite :

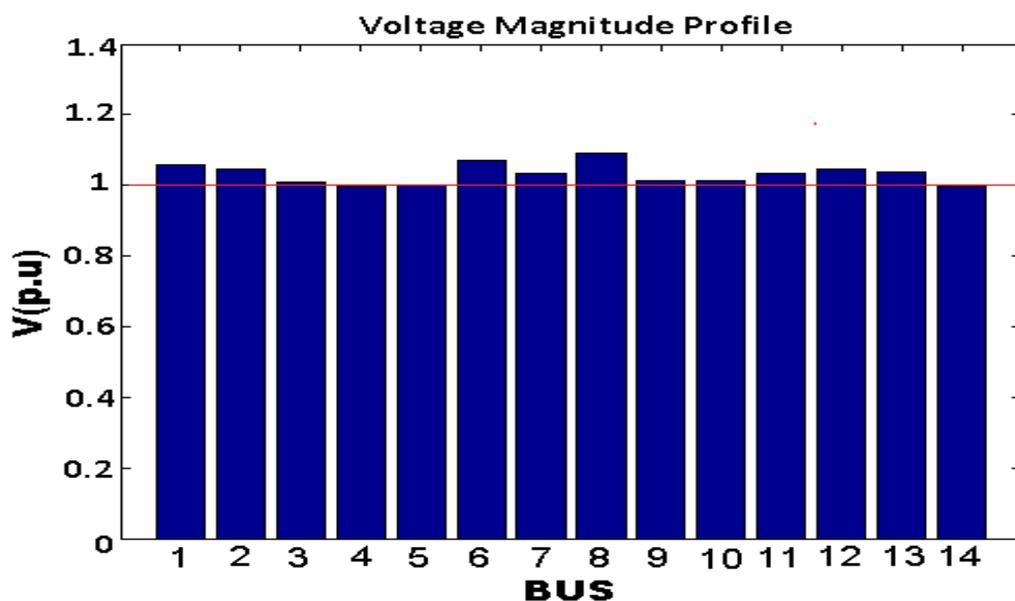


Figure 3.3. Les tensions de chaque jeu de barre

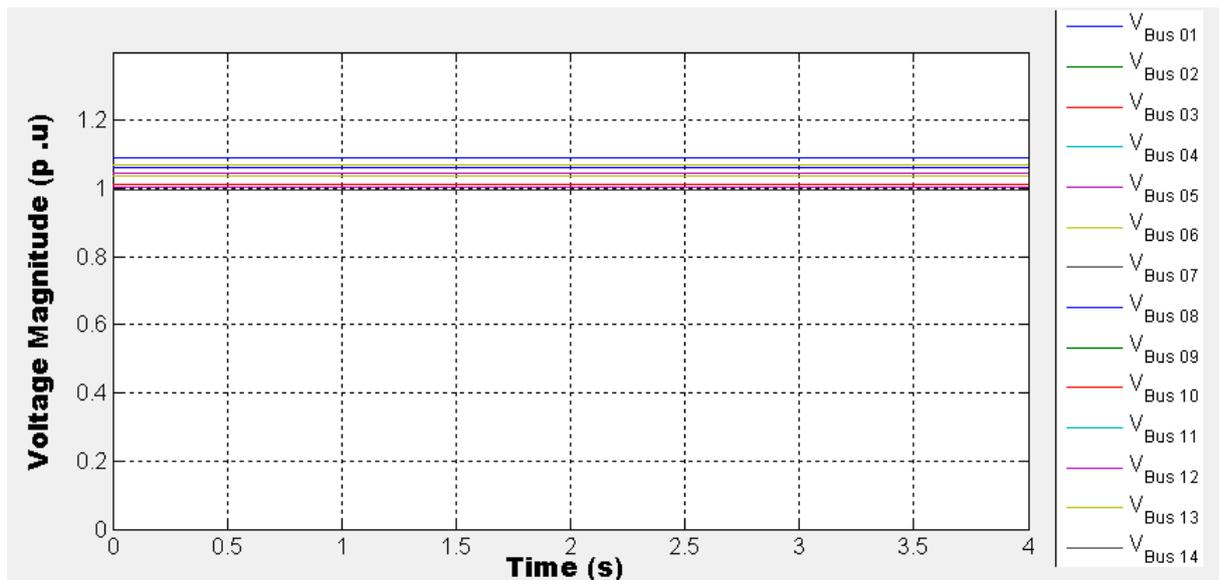


Figure 3.4. Les tensions de chaque jeu de barre en fonction de temps

3.4 Réseau test de 14 jeux de barre avec un défaut au nœud 11

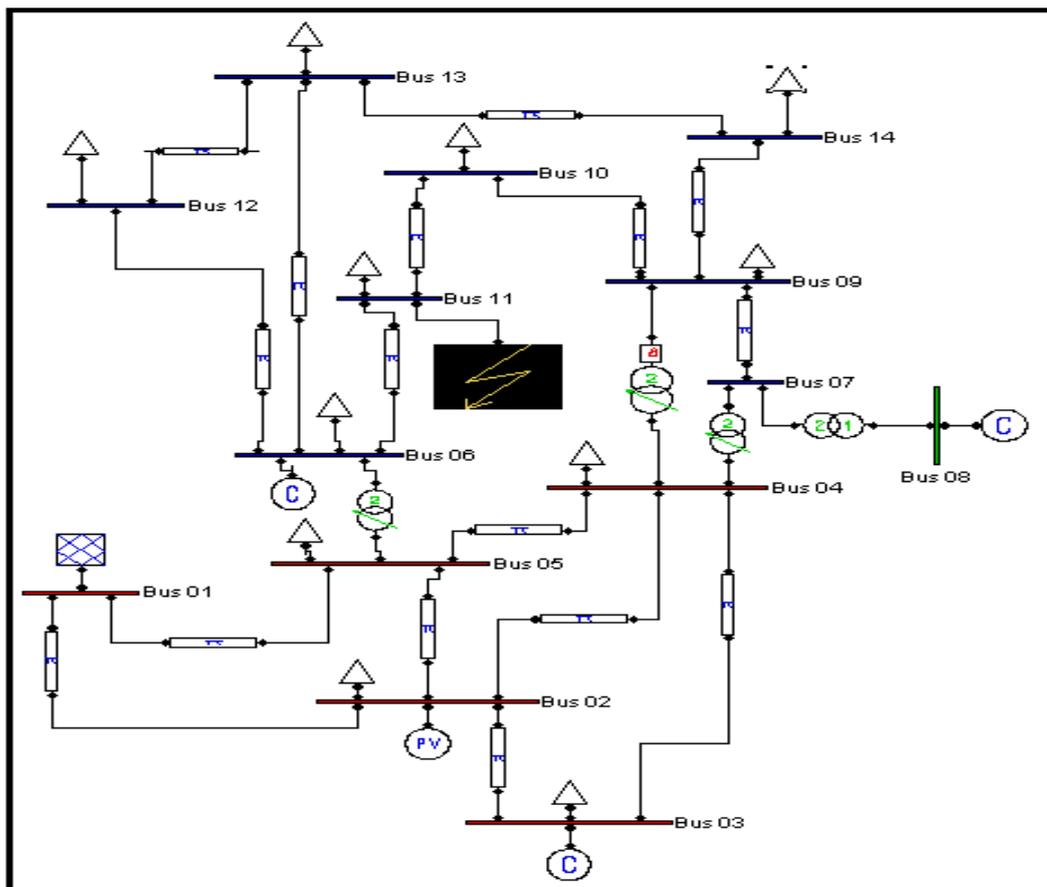


Figure 3.5. Topologie du réseau avec défaut.

Calcul de l'écoulement de la puissance avec création d'un défaut dans le nœud 11 :

Noeud	V [p.u.]	Phase [rad]	P généré [p.u.]	Q généré [p.u.]	P consommé [p.u.]	Q consommé [p.u.]
Noeud1	1,06	0	3,52054706	-0,27942846	0	0
Noeud2	1,045	-0,25371321	0,4	0,9531983	0,3038	0,1778
Noeud3	1,01	-0,5350749	0	0,59933222	1,3188	0,266
Noeud4	0,86305192	-0,48496008	0	0	0,6692	0,056
Noeud5	0,85019921	-0,46183934	0	0	0,1064	0,0224
Noeud6	1,07	-1,35467348	0	0,45685837	0,1568	0,105
Noeud7	0,83118114	-0,72291392	0	0	0	0
Noeud8	1,09	-0,72291392	0	0,34081317	0	0
Noeud9	0,66454311	-0,88107068	0	0	0,413	0,2324
Noeud10	0,46060789	-0,89962175	0	0	0,126	0,0812
Noeud11	0	-0,78103581	0	0	0,049	0,0252
Noeud12	1,0150861	-1,35822783	0	0	0,0854	0,0224
Noeud13	0,98230307	-1,32837064	0	0	0,189	0,0812
Noeud14	0,76425072	-1,14396796	0	0	0,2086	0,07

Tableau 3.2. Niveaux de tensions, puissances injectées et consommées (défaut bus 11)

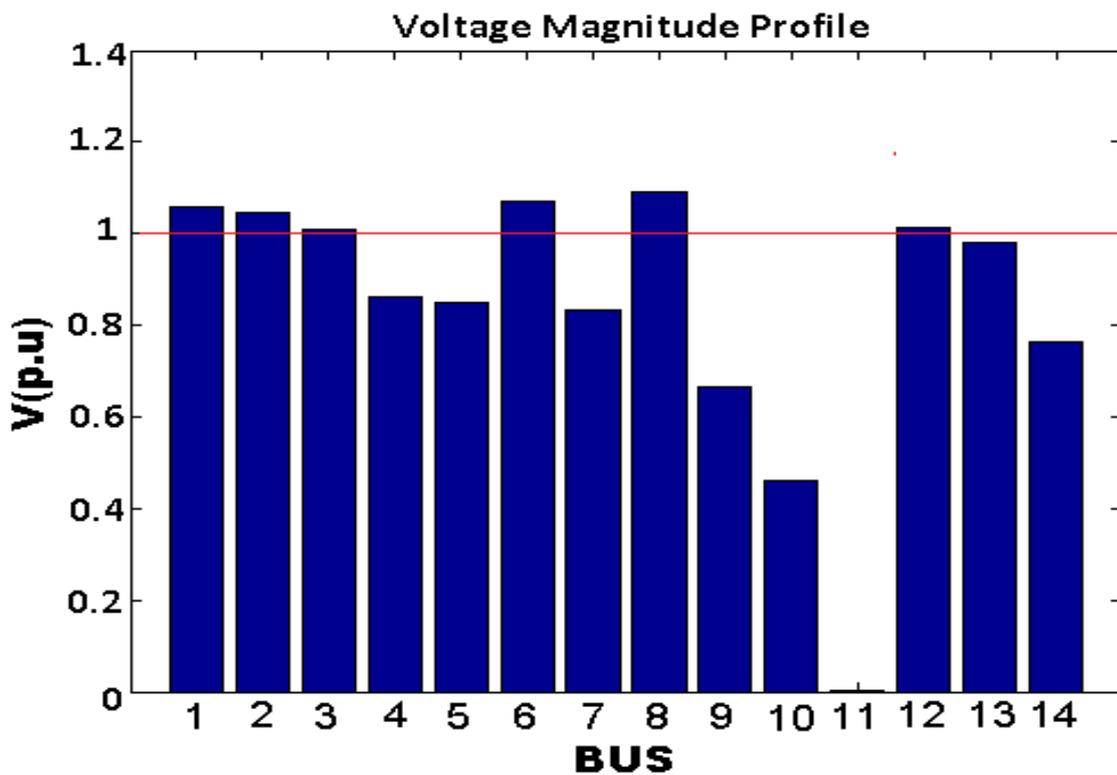


Figure 3.6 Les tensions de chaque jeu de barre après création d'un défaut.

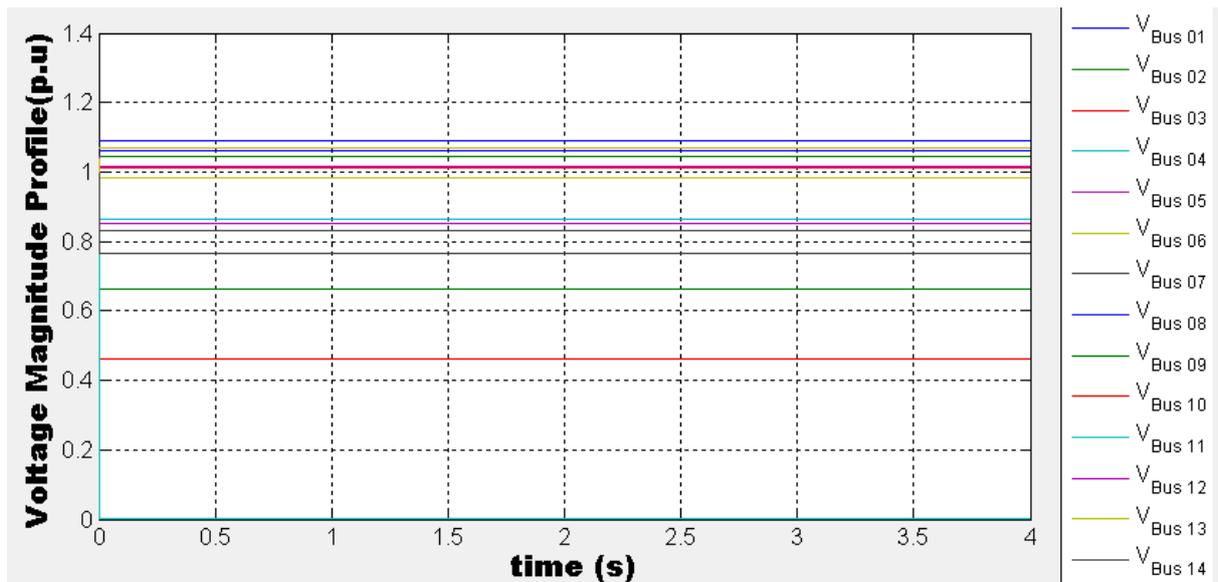


Figure 3.7. Les tensions de chaque jeu de barre après création d'un défaut en fonction de temps.

3.5 La connexion d'un dispositif FACTS (STATCOM) aux réseau

3.5.1 La connexion d'un dispositif FACTS (STATCOM) aux bus 4

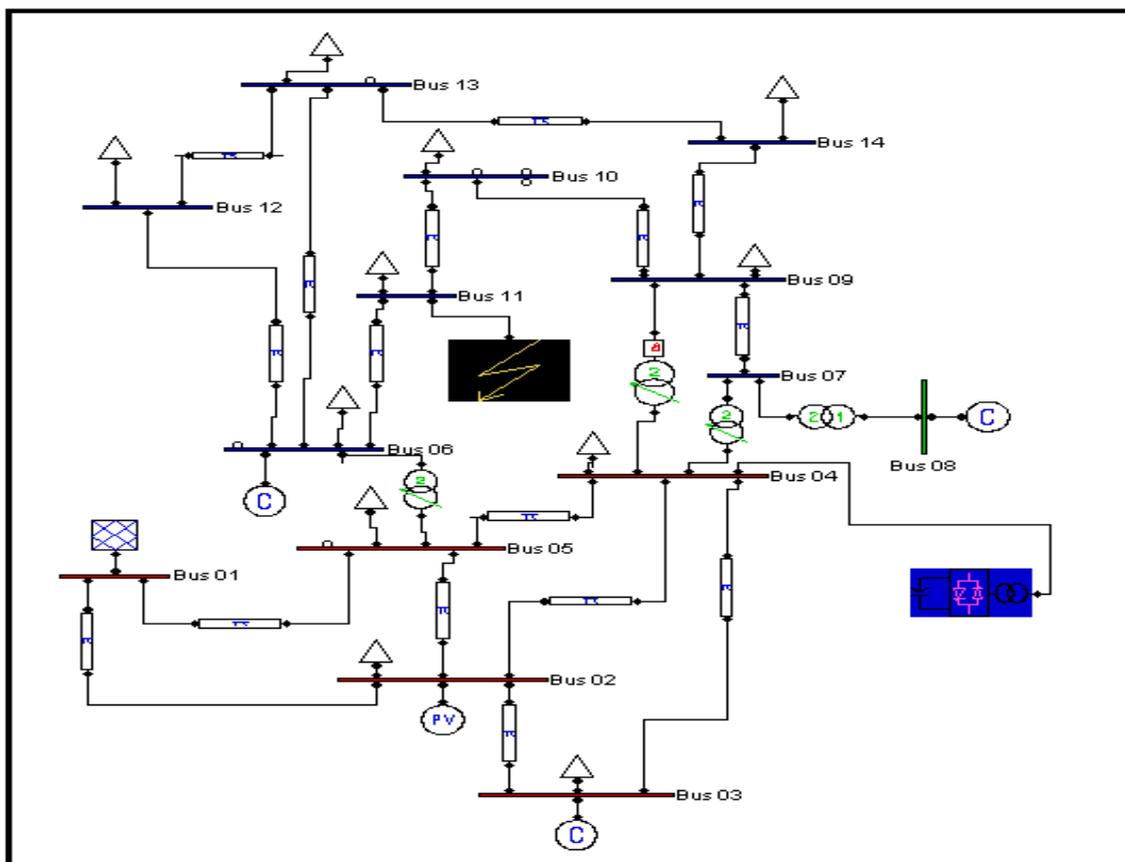


Figure 3.8. Topologie du réseau avec la connexion de STATCOM au bus 4

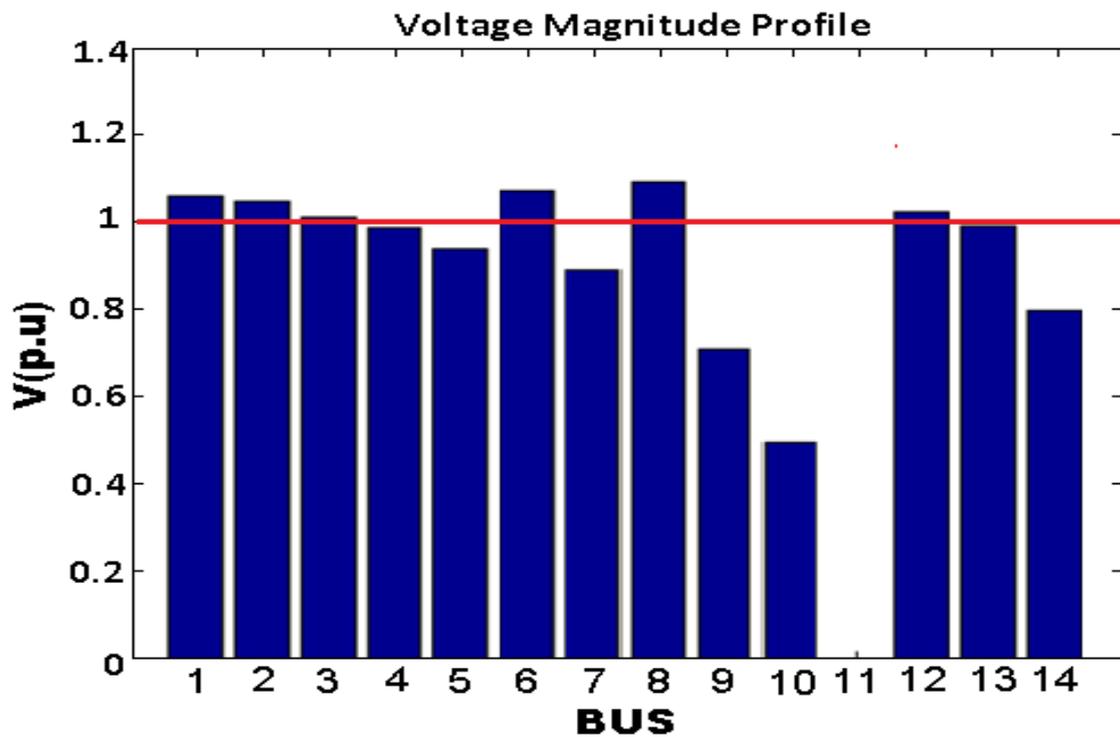


Figure 3.9. Les tensions de chaque jeu de barre après la compensation (STATCOM en bus 4)

3.5.2 La connexion d'un dispositif FACTS (STATCOM) aux bus 4 et bus 10

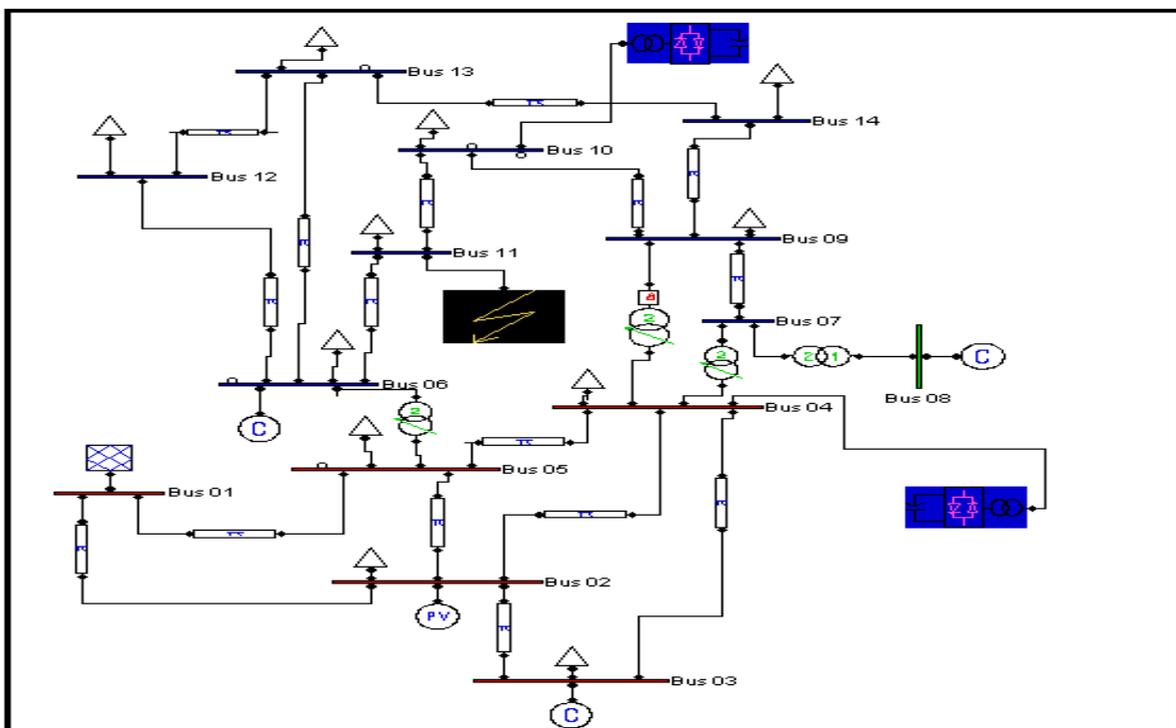


Figure 3.9. Topologie du réseau avec la connexion de STATCOM au bus 4 et bus 10

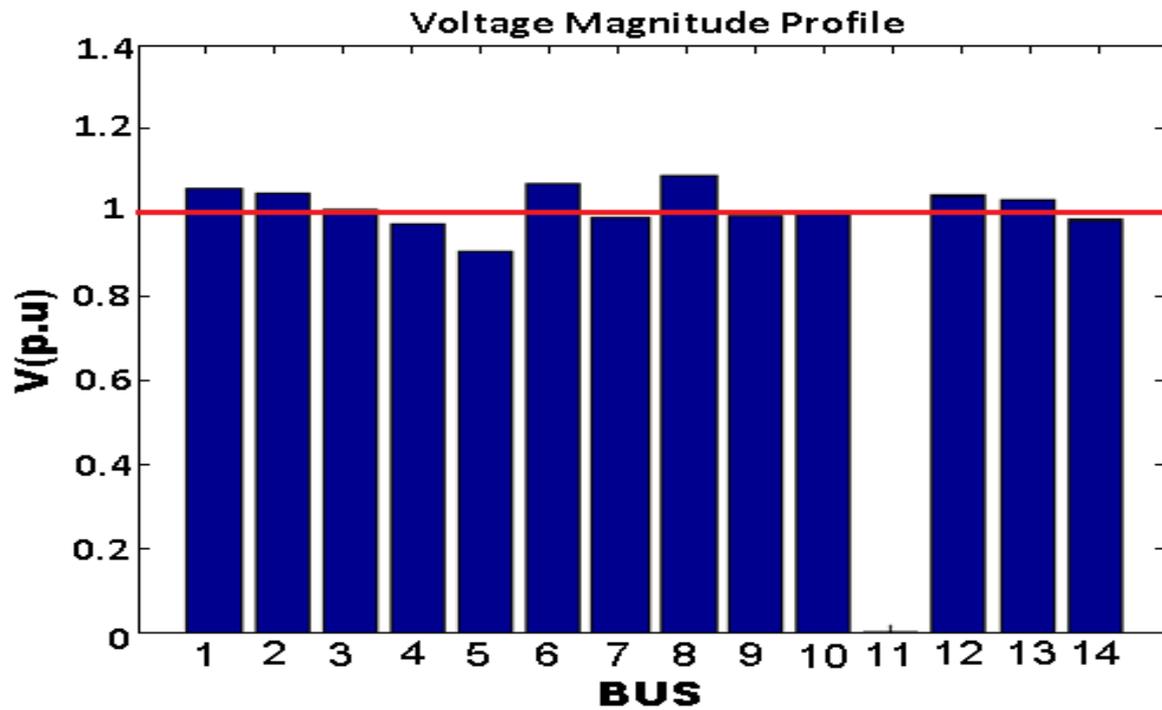


Figure 3.10 Les tensions de chaque jeu de barre après ajoute le STATCOM au bus 4 et 10

3.5.3 La connexion d'un STATCOM aux bus 4 et bus 10 et 6 :

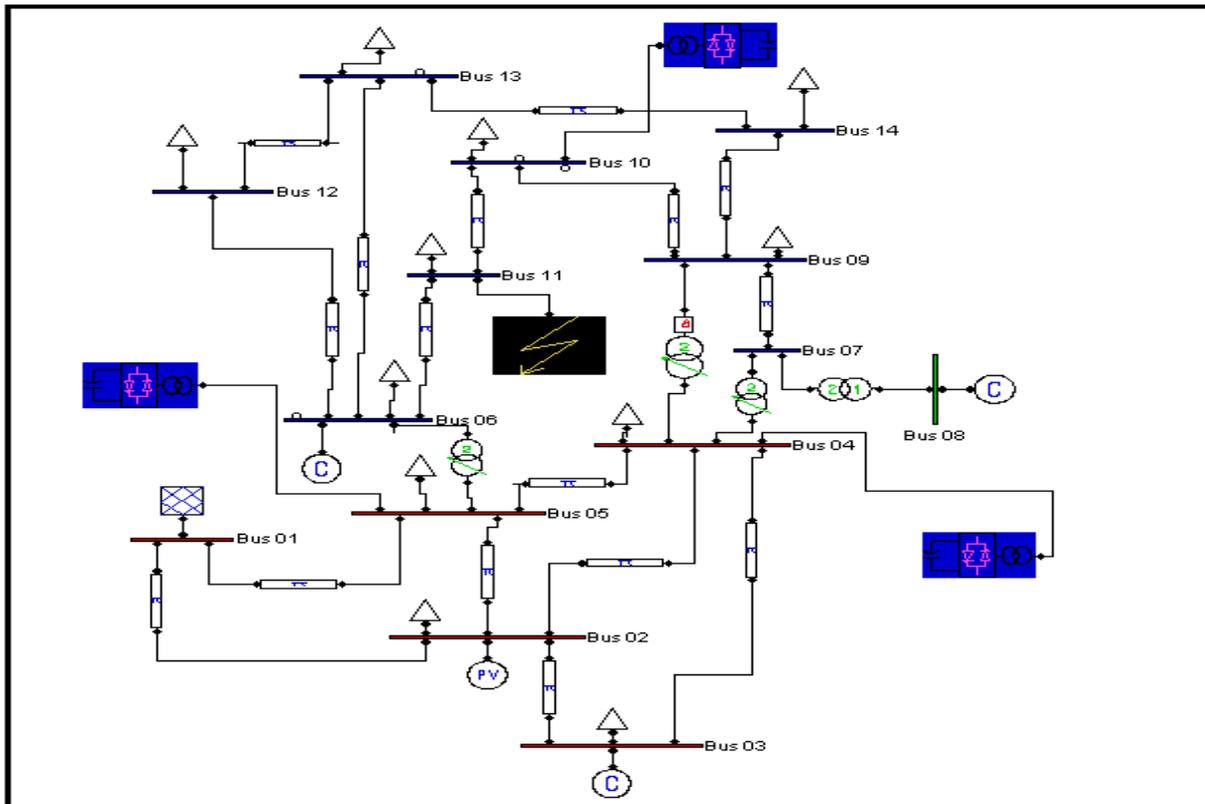


Figure 3.11. Topologie du réseau avec la connexion de STATCOM au bus 4 et bus 10 et bus 6

Calcul de l'écoulement de la puissance avec compensateur par STATCOM :

Noeud	V [p.u.]	Phase [rad]	P généré [p.u.]	Q généré [p.u.]	P consommé [p.u.]	Q consommé [p.u.]
Noeud	1,06	0	3,52054706	-0,27942846	0	0
Noeud2	1,045	-0,34533422	0,4	0,9531983	0,3038	0,1778
Noeud3	1,01	-0,66404856	0	0,59933222	1,3188	0,266
Noeud4	1,01264273	-0,71141709	0	0	0,6692	0,056
Noeud5	1,0056423	-0,64734804	0	0	0,1064	0,0224
Noeud6	1,07	-1,38868917	0	0,45685837	0,1568	0,105
Noeud7	1,00644523	-1,1166005	0	0	0	0
Noeud8	1,09	-1,1166005	0	0,34081317	0	0
Noeud9	1,00311549	-1,32278929	0	0	0,413	0,2324
Noeud10	0,99883977	-1,52251259	0	0	0,126	0,0812
Noeud11	0	-1,0303303	0	0	0,049	0,0252
Noeud12	1,0447188	-1,40490023	0	0	0,0854	0,0224
Noeud13	1,03570057	-1,40037691	0	0	0,189	0,0812
Noeud14	0,99070383	-1,38318778	0	0	0,2086	0,07

Tableau 3.3. Niveaux de tensions, puissances injectées et consommées (avec le STATCOM)

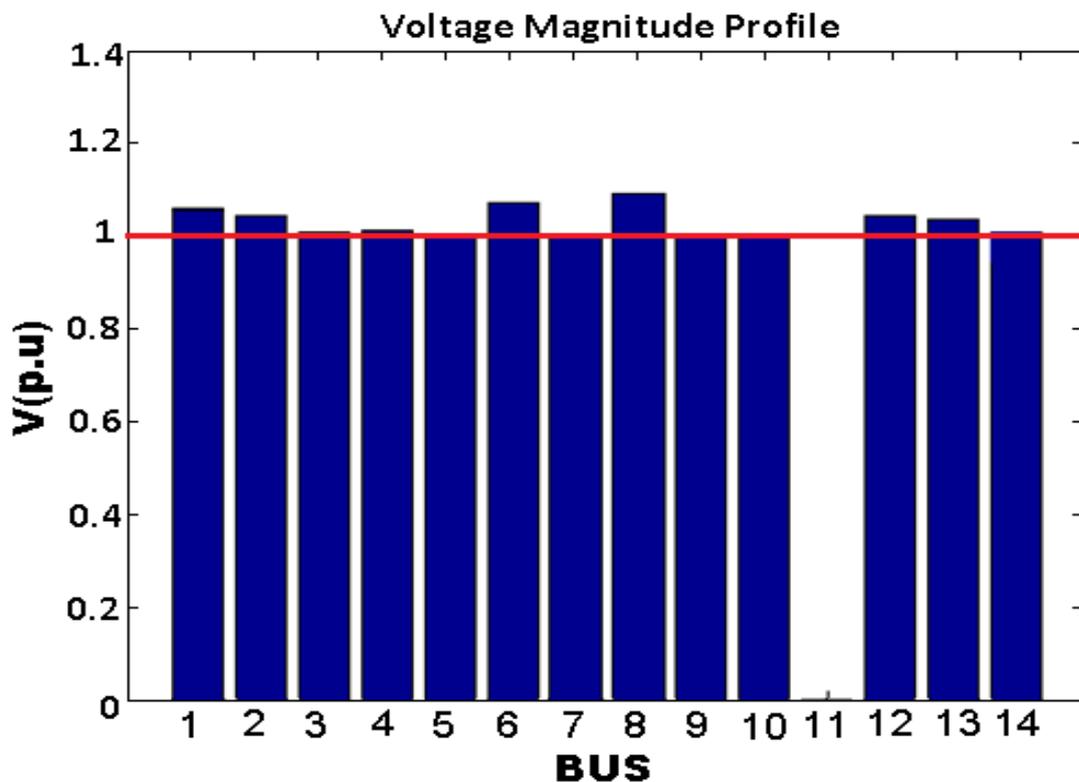


Figure 3.12. Les tensions de chaque jeu de barre après la compensation

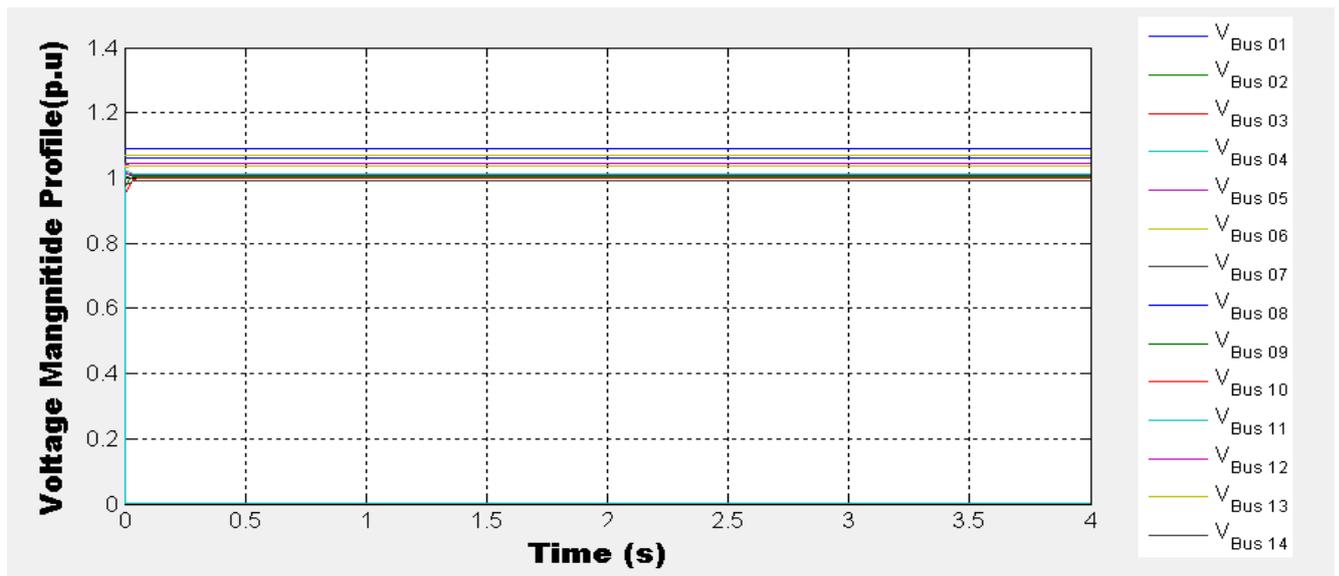


Figure 3.13. Les tensions de chaque jeu de barre après la la compensation en fonction de temps

3.6 Comparaison entre la tension des nœuds avant et après la compensation

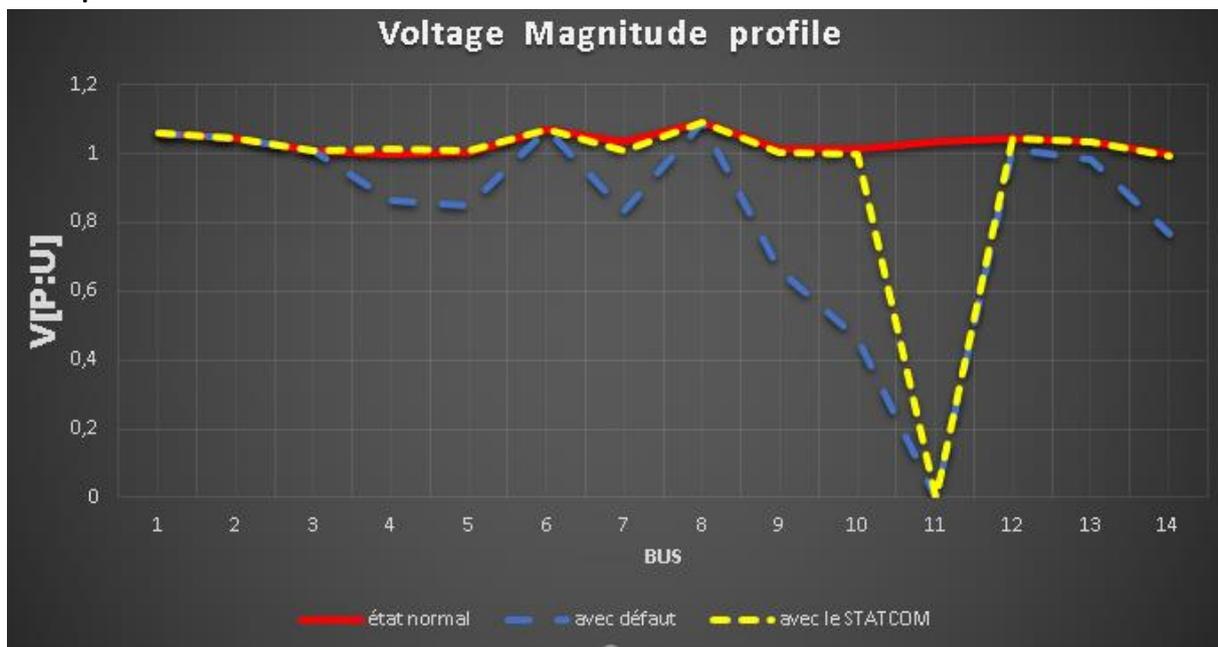


Figure 3.14 Comparaison entre la tension des nœuds

3.6.1 Les commentaires

Suite à l'apparition de défaut, nous remarquons que les tensions dans quelques nœuds du réseau sont fortement influencées:

- Au bus de défaut (bus 11) la tension est nulle.
- Quant aux bus 4, 5, 7, 9, 10,13 et 14, la tension a fortement diminué par rapport à l'état normal.
- Alors que dans les nœuds 3,6 et 8 les tensions sont restées les mêmes grâce aux compensateurs qui y sont raccordés.

Après la compensation avec le STATCOM :

- Les nœuds 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,12,13,14 sont les même avec l'état initial
- Nous constatons, suite aux divers calculs de l'écoulement de puissance, que : Le STATCOM a réglé ou augmenté la tension au nœud à la tension de référence (1 P.U).

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait la compensation de la tension des nouds par le dispositif STATCOM dans l'environnement MATLAB/SIMULINK et au logiciel PSAT. Les résultats obtenus sont bien illustrés, et ils ont prouvés que la tension au jeu de barre de raccordement est bien réglée, ils ont prouvé aussi la flexibilité, la sensibilité et la rapidité de dispositif utilisé.

Conclusion générale

Le développement de l'électronique de puissance a permis d'améliorer la gestion des réseaux électriques en introduisant un nouveau concept comme les systèmes flexibles de transmission à courant alternatif appelée FACTS, avec lesquels le contrôle du flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge des lignes, sont atteints et performés par l'injection des tensions (ou courant). Des convertisseurs conçus avec des interrupteurs statiques modernes commandés tels que les GTO, IGBT présentent la nouvelle génération de ces systèmes FACTS.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur le contrôle de la tension par compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif STATCOM. Afin d'atteindre cet objectif, nous sommes passés par plusieurs étapes :

- En première étape, nous avons commencé par une brève étude des lois de transport de l'énergie électrique en exposant la problématique de limite de puissance transportable en fonction des paramètres des réseaux ainsi que la chute de tension.
- Le deuxième chapitre les principes de fonctionnements des différents types des dispositifs FACTS.
- Le troisième chapitre a fait l'objet d'une étude plus détaillée sur le compensateur STATCOM, structure de base, principe de fonctionnement et son réglage compensative sur un réseau de transport électrique.
- Pour valider cette étude théorique, nous avons effectué dans le dernier chapitre plusieurs essais de simulations sur un STATCOM couplé avec un réseau de transmission à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink.

Ces résultats ont vérifié l'efficacité de la stratégie de commande adoptée qui a permis un contrôle indépendant et découplé des puissances active et réactive de ce dispositif en minimisant l'effet d'interaction entre ces puissances.

Finalement en terminant ce travail par l'application du STATCOM sur un réseau modèle IEEE 14 nœuds par l'utilisation de logiciel PSAT, afin de rétablir les transits de puissances ainsi que le plan de tension à son état normal, après une perturbation bien déterminé (défaut

Références Bibliographiques

- [1] A. Senni et F. Azizi. « Control de tension de réseau de transport par les dispositif FACTs (SVC) ». Projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD, université d'Adrar le 6/6/2013.
- [2] M. Boudor, A. Hellal" Réseaux Electriques Fondamentaux et Concept de Base ". Copyright Eurl pages Bleues Internationales 2010
- [3] N. Azzoug, F. Ben hamama, « Amélioration de la qualité la tension d'un réseau électrique par l'utilisation d'un STATCOM ", mémoire de master, université de Bejaia 2016/2017
- [4] M. B. Ouadaya et M. Drissi, "Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacement optimal des dispositif FACTs", mémoire Master Académique, université Taher Molay Saida soutenu le 03/07/2017.
- [5] S. Boutaba. « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un SVC". Mémoire de magister, université Hassiba ben Bouali. Soutenu le 09/06/2009
- [6] Mr ABDelmalek, Meftouhi. "Influence des FACTs sur l'écoulement de puissance dans les réseaux d'énergie électriques ", mémoire de magister, université des Mohamed Boudiaf ORAN 2012/2013
- [7] Boumediene, « Placement Des Dispositifs « D-FACTS » et contrôle des tensions dans un réseau de distribution », Thèse de doctorat ès-science, l'USTO, 04 Janvier 2010.
- [8] Kassou Amina, Merzougui Meriem, « Impact d'un dispositif FACTS (Flexible AC Transmission Systems) sur l'écoulement de puissance » Mémoire de Master, Université de Saida, 28 octobre 2013.
- [9] Ben Hakkoum Med abdelilah, Legougui Ali, « Compensation de l'énergie réactive d'un réseau IEEE par système FACTS », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ourgla, 2016.
- [10] Laib Hichem "Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC " mémoire de magister, université de Batna 2009.
- [11] E.G. Shahraki "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques" Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy, France, 13 octobre 2003.
- [12] J.C. Passelergue "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques" Thèse de doctorat de l'INPG 26 Novembre 1998.
- [13] Amir H. Norouzi "Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC", Thèse de magister de l'université de New Brunswick, 2003.
- [14] I. Papiê "Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models", electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.

